

Joonas Pokela

# Lämmönsiirtimien huoltojen optimointi kunnonseurantajärjestelmän avulla

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikka

Insinöörityö

28.2.2018

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Joonas Pokela Lämmönsiirtimien huoltojen optimointi kunnonseurantajärjestelmän avulla 51 sivua + 2 liitettä 28.2.2018
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Konetekniikka
Ammatillinen pääaine	Koneautomaatio
Ohjaajat	Lehtori Heikki Paavilainen Ryhmäpäällikkö Mika Uussilta Kehityspäällikkö Emmi Arimo
<p>Tässä insinöörityössä tutkitaan lämmönvaihtimien vuosihuoltojen optimointia ja käytettävyyden kehittämistä kunnonseurantajärjestelmän avulla. Tavoitteena oli selvittää eri menetelmien mahdollisuuksia toteuttaa tarvittava kunnonseurantajärjestelmä lämmönvaihtimen tehon ja likaantumisen seuraamiseksi ja ennustamiseksi, sekä menetelmistä aiheutuvia kustannuksia.</p> <p>Digitalisaatio, älykkäät järjestelmät, tekoäly ja IoT (Internet of Things) muuttavat perinteisen kunnossapidon luonnetta niiden mahdollistamien kunnonseurantajärjestelmien avulla. Mittaustekniikat ja standardisointi kehittyvät jatkuvasti alentaen automaatio- ja mittauslaitteistojen kustannuksia. Yhä useampi kunnossapitoa vaativa kohde on taloudellisesti kannattavaa anturoida, jolloin laitteen kunnossapitotarve voidaan ennakoida ja huollot optimoida. Mittausdatasta saadun tiedon avulla saadaan tietoa laitteen toiminnasta, kulumisesta ja mahdollisesta vikaantumisesta etukäteen. Älykkäiden järjestelmien avulla tuotannon pysäytykset yllättävien laiterikkojen takia voidaan välttää. Etukäteen suunnittelemalla voidaan minimoida huoltopysäytyksiin käytetty aika ja suunnitella pysäytykset edulliseen ajankohtaan.</p> <p>Työn kirjallisuusosassa esitellään lämmönsiirron teoriaa lämmönvaihtimien näkökulmasta sekä levylämmönvaihtimien toimintaa ja siihen vaikuttavia tekijöitä. Työ on kohdistettu Neste Oyj:n Jäähdytysvesilaitos 2:een, jossa teoria yhdistyy käytäntöön. Soveltavassa osuudessa kuvataan automaatiomuutoksen vaatimat toimenpiteet kunnonseurantajärjestelmän toteuttamiseksi, näistä on käsitelty eri vaihtoehdot sekä mittausmenetelmälle että automaatiomuutoksen toteutukselle. Työssä on myös kuvattu eri pesumenetelmiä levylämmönvaihtimille.</p> <p>Työn lopputulos on ehdotus kunnonseurantaan perustuvasta, vaihtoehtoisia pesumenetelmiä hyödyntävästä vuosihuoltosuunnitelmasta. Työhön sisältyy myös investointilaskelma, jossa on arvioitu automaatiomuutoksen kannattavuutta verrattuna tämän hetken huoltotöihin.</p>	
Avainsanat	Lämmönvaihdin, lämmönsiirto, kunnonseuranta, lämmönsiirto-kerroin, optimointi

Author Title Number of Pages Date	Joonas Pokela Optimizing the Maintenance of Heat Exchangers through a Condition Monitoring System 51 pages + 2 appendices 28 February 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical and Production Engineering
Professional Major	Machine Automation
Instructors	Heikki Paavilainen, Senior Lecturer Mika Uussilta, Group Manager Emmi Arimo, Development Manager
<p>This Bachelor's thesis studies the optimization of the annual maintenance of seawater heat exchangers through a condition monitoring system. The potential of different methods and costs are taken into consideration to conduct the necessary monitoring of the fouling and cooling power. The thesis was assigned by Neste Corporation.</p> <p>The nature of traditional maintenance is changing due to digitalization, intelligent systems, artificial intelligence and IoT (Internet of Things). Standardization and measuring techniques are evolving and therefore, the costs of automation systems and condition monitoring systems are continually decreasing. Due to the decrease in prices, systems that require maintenance become more profitable to be equipped with a condition monitoring system. This enables the anticipation and optimization of the annual maintenance. Condition monitoring systems provide information of the operation, wear and potential failure of the systems. Smart condition monitoring systems in industrial applications can prevent unexpected stops due to hardware failure. With knowledge of the condition of the hardware, it is possible to minimize production downtime by planning maintenance shutdowns in advance.</p> <p>The theory of heat transfer was examined from the point of view of heat exchangers. The thesis is focused on the process and heat exchangers of Neste Corporation's Cooling Water Plant 2. The practice part of the thesis describes the suggested procedures to implement the necessary condition monitoring system and alternative methods to conduct the required measurements.</p> <p>As a result of this thesis, a maintenance program was proposed, which is based on condition monitoring and alternative washing methods. The thesis also contains maintenance investment calculation, where the profitability of the condition monitoring system is evaluated. The evaluation is carried out by comparing the benefits of the proposed maintenance program with today's maintenance habits.</p>	
Keywords	Heat exchanger, heat transfer sufficient, condition monitoring, optimization

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Työn tausta	1
1.2	Työn tavoitteet ja rajaus	2
2	Neste Oyj	3
3	OmaisuuDENhallinta	4
3.1	OmaisuuDENhallintajärjestelmä	4
3.2	OmaisuuDEN eheyDEN hallinta	5
4	LevylämmönvaihDin	7
4.1	Toimintaperiaate	8
4.2	Puhdistus, huolto ja kunnossapito	10
5	Jäähdytysvesilaitos 2	13
5.1	Rakenne ja toiminta	13
5.2	Vuotuinen kunnossapito	16
6	Lämmönsiirron energiatehokkuus	18
6.1	Lämmönvaihtimen likaantuminen	18
6.2	Likaantumismekanismit	20
6.3	Likaantumisen vähentäminen	22
6.4	Lämmönsiirron energiatehokkuuDEN analysointi	23
6.4.1	Lämmönsiirron analysointimenetelmä	24
6.4.2	Lämpötilojen vertailumenetelmä	27
7	Instrumentointi	28
7.1	Standardit ja spesifikaatiot	28
7.2	Kenttälaitteiden valinta	29
7.2.1	Virtausmittaus	30
7.2.2	Lämpötilamittaus	31

7.3	Mittauksen tie automaatiojärjestelmään	32
7.3.1	Langallinen kenttälaite	32
7.3.2	Langaton kenttälaite	34
8	Jäähdytysvesilaitos 2:n analyysi	39
8.1	Lämmönsiirron analysointimenetelmä	40
8.2	Lämpötilojen vertailumenetelmä	43
9	Investointilaskelma	44
10	Vuosihuoltojen toimintamallin muutos	45
10.1	Tarve muutokselle	45
10.2	Ehdotus vuosihuoltojen toimintatapamuutoksesta	46
10.3	Uuden toimintamallin käyttöönotto vaiheittain	46
10.4	Muita ehdotuksia toiminnan parantamiseksi	47
11	Yhteenveto ja päätelmät	48
	Lähteet	50
	Liitteet (vain työn tilaajan käyttöön)	
	Liite 1. JÄÄHDVL2 automaatiomuutoksen investointilaskelma	
	Liite 2. JÄÄHDVL2 merivesivaihtimien vuosihuoltojen toimintamallin muutosehdotus	

## Lyhenteet

CIP	<i>Cleaning In Place</i> ; kierrätyspesu
CMS	<i>Configuration management system</i> ; kokoonpanon hallintajärjestelmä
DCS	<i>Distributed control system</i> ; hajautettu ohjausjärjestelmä
I/O	<i>Input / Output</i> ; tulo / lähtö
ISCC	<i>International Sustainability &amp; Carbon Certification</i> ; kansallisen kestävyysjärjestelmän sertifikaatti
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> ; kansainvälinen standardisoimisjärjestö
ITPM	<i>Inspection, Testing and Preventive Maintenance</i> ; tarkastukseen, koestukseen ja ennakoivaan kunnossapitoon perustuva huoltosuunnitelma
JÄÄHDVL2	Jäähdytysvesilaitos 2
NO	Neste Oyj
TL	Tuotantolinja
TOP	Jalostamonlaajuinen prosessitietokonejärjestelmä
XCV	Paineilmaohjattu sulkuventtiili

## 1 Johdanto

### 1.1 Työn tausta

Tämä insinöörityö tehtiin Neste Oyj:lle (NO) Porvoon jalostamolle. Insinöörityön tavoitteena on tehdä tutkimus lämmönvaihtimien likaantumisen seurannan mahdollistavasta järjestelmästä.

Nesteen öljynjalostamolla tuotantolinja 3:n (TL3) Jäähdytysvesilaitos 2:n (JÄÄHDVL2) levylämmönvaihtimet ovat kriittisiä laitteita prosessin kannalta. Jäähdytysvesilaitoksen levylämmönvaihtimien lämpötilamittaukset olivat tätä työtä tehtäessä paikallisia kenttämittauksia. Viemällä lämmönvaihtimiin liittyvät tärkeät mittaukset automaatiojärjestelmään, voitaisiin niitä analysoimalla seurata näiden kriittisten laitteiden kuntoa ja likaisuutta, sekä optimoida tulevia huoltoja paremmin.

Mittausdatan avulla tehdyn kuntoanalyysin perusteella voitaisiin suunnitella ja optimoida vuosittaiset levylämmönvaihtimien pesut ja huollot. Lämmönvaihtimien yksilöity kunnonseuranta parantaisi jäähdytysvesilaitoksen toiminnan luotettavuutta ja käytettävyyttä sekä mahdollistaisi ennakkoinnin lämmönvaihdinten yksilöllisistä huoltotarpeista.

## 1.2 Työn tavoitteet ja rajaus

Tämän insinööri työn tavoitteena oli tutkia ja selvittää yksilöllisen kunnon seurannan vaatimat toimenpiteet ja laatia arvio toteutuksen kustannuksista ja hyödyistä. Tavoitteena oli myös tehdä suunnitelma uudesta tehonmittauksia hyödyntävästä huoltoja optimoivasta toimintamallista. Työn tarkoituksena oli myös selvittää ja ottaa kantaa siihen, millä tavoilla lämmönsiirron energiatehokkuutta voidaan mitata, seurata ja analysoida sekä arvioida näiden toimenpiteiden tuomia mahdollisuuksia kunnossapidon optimointiin. Työssä selvitetään eri vaihtoehtoja mittausdatan tuomiseksi automaatiojärjestelmään sekä arvioidaan mahdollisia toimintatapamuutoksia JÄÄHDVL2:n vuosihuoltoihin. Työhön sisällytettiin myös investointiehdotus automaatiomuutokselle.



## 2 Neste Oyj

Neste Oyj on maailman johtava uusiutuvien polttoaineiden tuottaja. Nesteellä on toimipisteitä 14 eri maassa ja henkilökuntaa noin 5 000 henkilöä. Yrityksellä on tuotantoa neljässä eri maassa: Suomessa, Hollannissa, Singaporessa ja Bahrainissa. Suomessa Porvoon ja Naantalin jalostamot on yhdistetty yhdeksi jalostamokokonaisuudeksi, joka koostuu viidestä tuotantolinjasta. Porvoossa on neljä tuotantolinjaa, ja Naantali toimii viidentenä tuotantolinjana.

Nesteen arvoihin kuuluvat vastuullisuus, yhteistyö, uudistuminen ja tuloksellisuus. Nesteen vastuullinen toiminta on saanut tunnustusta muun muassa Dow Jonesin kestävä kehityksen indeksissä ja maailman vastuullisimpien yhtiöiden Global 100 -listalla. Mahdollisimman vähän ympäristöä kuormittava tuotanto on yhtiölle ensiarvoisen tärkeää, ja kaikilla Nesteen uusiutuvien tuotteiden jalostamoilla on ISCC-sertifikaatti (*International Sustainability & Carbon Certification*) tai Yhdysvaltain ympäristöviranomaisen (*Environmental Protection Agency*) hyväksyntä. Sen lisäksi Porvoon, Naantalin, Rotterdamin ja Singaporen jalostamoille on myönnetty ISO 14001 -ympäristösertifikaatti.

Nesteen missio on ”*Refining the future*”. Yhtiö haluaa haastaa perinteisen öljynjalostusteollisuuden tarjoamalla yhä puhtaampia polttoaineratkaisuja ja uusiutuviin raaka-aineisiin perustuvia sovelluksia. Nesteen tuotteisiin kuuluu ensimmäisenä maailmassa 100 % tähteistä ja jätteistä valmistettu diesel. ”Haluamme olla Itämeren alueen johtava toimija” ja ”Haluamme kasvaa globaalisti uusiutuviin tuotteisiin” ovat Nesteen kaksi strategista tavoitetta.

[10.]

### 3 Omaisuudenhallinta

#### 3.1 Omaisuudenhallintajärjestelmä

Omaisuudenhallinta (*Asset Management*) on organisaation johtamismalli, jossa toteutetaan standardin ISO 55000 mukaista toimintamallia. Standardissa ISO 55000 kuvataan organisaatiossa tarvittavat vastuut, menettelytavat ja vuorovaikutukset, jotta organisaation päämäärät ja strategiset tavoitteet saavutetaan. Standardi ISO 55001 määrittelee omaisuudenhallintajärjestelmää koskevat vaatimukset, mutta itse järjestelmä tulee suunnitella ja luoda kyseiselle organisaatiolle sopivaksi. Standardi ISO 55002 antaa ohjeita omaisuudenhallintajärjestelmän suunnittelusta ja käytöstä.

Omaisuudenhallintajärjestelmä tarjoaa järjestelmällisen lähestymistavan omaisuuteen kohdistuvien toimenpiteiden kehittämiseen, koordinointiin ja ohjaukseen organisaatiossa. Järjestelmää luodessa tarkastellaan organisaation tavoitteita ja luodaan uudet toimintatavat tavoitteiden saavuttamisen ympärille standardin mukaisesti. Järjestelmällinen omaisuutta koskevan tiedon kerääminen, kokoaminen, hallinta ja analysointi lisäävät organisaation tietoisuutta ja parantavat päätöksentekokykyä. Omaisuudesta kerätty tieto auttaa saamaan käsityksen sen toiminnan tasosta, sen hallintaan liittyvistä riskeistä, investointitarpeista ja arvosta. Järjestelmän luomisprosessi luo uusia näkökulmia organisaatioon ja innovaatioita omaisuuden käytöstä saatavan lisäarvon luomiseen.

Omaisuudenhallintajärjestelmässä ylin johto luo järjestelmän, arvot ja visiot organisaatiolle. Organisaatiossa korostuu nykyaikainen johtamismalli, jossa jokaisessa johtoportaassa olevat johtajat ovat sitoutuneet järjestelmään ja varmistavat järjestelmän tueksi tarvittavia resursseja ja jossa vallitsee avoin ilmapiiri. Organisaatiossa viestinnän tulee olla kaksisuuntaista ja johdon tulee ottaa avoimesti vastaan tietoa ja ideoita jokaiselta organisaatiotasolta ja kehittää omaisuudenhallintajärjestelmää aktiivisesti. Järjestelmän tavoitteita on, että jokainen organisaatioon tai sen sidosryhmiin kuuluva tietää oman roolinsa, vastuunsa ja valtuutensa. Järjestelmää tulee kehittää jatkuvasti, jotta se sopeutuu organisaation toimintaympäristöön ja tavoitteisiin.

[2.]

### 3.2 Omaisuuden eheyden hallinta

Omaisuuden eheyden hallinnan (*Asset Integrity Management*) tarkoituksena on varmistaa, että teollisuuden laite toimii sille suunnitellulla tavalla turvallisesti koko sen elinkaaren ajan. Omaisuuden eheyden hallinta lisää laitoksen käytettävyyttä teollisuudessa, kun odottamattomat pysäytykset ja suunnittelemattomat korjaukset saadaan minimoitua järjestelmällisten toimintatapojen ansiosta. Korroosio, eroosio ja materiaalin väsyminen ovat esimerkkejä asioista, jotka tulee hallita, havaita ja korjata, ennen kuin tuotantolaitoksen laitteiston kyky reagoida häiriöön heikkenee tai menetetään.

Elinkaariajattelu ja elinkaaren hallinta on oleellinen osa omaisuuden eheyden hallintaa. Elinkaariajattelussa otetaan huomioon jo suunnitteluvaiheessa investoinnin koko elinkaaren aikaiset kustannukset. Suunnitteluvaiheessa voidaan hyvällä ja perinpohjaisella suunnittelulla sekä laadukkaisiin laitteisiin ja materiaaleihin investoimalla saavuttaa alhaiset ylläpitokustannukset ja matala käytettävyyseriski laitteistolle. Päinvastoin huolimattomalla suunnittelulla ja halvalla laitteistolla voidaan säästää investointivaiheessa, mutta odottamattomat ja suunnittelemattomat laiterikot ja pysäytykset sekä toimenpiteet huolimattoman suunnittelun korjaamiseksi aiheuttavat suuremmat kustannukset laitteiston elinkaaren aikana. Elinkaariajattelun mukainen suunnittelu ottaa huomioon myös kokonaisen laitoksen käytön aikaiset kustannukset esimerkiksi minimoimalla kiinteiden laitteiden määrän vuotuisten tarkastus- ja ylläpitokustannusten minimoimiseksi. Esimerkiksi nestevirtojen liikuttelu painovoimaisesti vähentää ylimääräisten siirtopumppujen tarvetta.

Kriittisyyden määrittelyllä arvioidaan laitteen vikaantumisesta johtuvat taloudelliset ja ai-neelliset vaikutukset. Kriittisyyttä voidaan arvioida vikaantumisten seuraamusten vaka-vuuden ja niiden todennäköisyyden perusteella. Jotkin laitteet kuten turvapiirit voidaan myös erikseen määritellä kriittisiksi laitteiksi. Kriittisyyden määrittelyn avulla laitteet voi-daan jakaa eri kategorioihin ja niille suunnitellaan riittävän tiheät tarkastus- ja koeistus-välit eheyden varmistamiseksi. Kriittisille laitteille vaaditaan valmistajalta eheysvaatimus, jossa on arvioitu vikaantumismahdollisuus tiettyä tuntimäärää kohden.

Osana omaisuuden eheyden hallintaa on kehittää tarkastukseen, koestukseen ja ennakkoivaan kunnossapitoon perustuva huoltosuunnitelma (*Inspection, Testing and Preventive Maintenance*, myöhemmin ITPM). Sen tarkoituksena on kunnonvalvontajärjestelmien, sekä järjestelmällisten tarkastusten ja koeistuksien avulla minimoida vikaantumistaajuutta suorittamalla ylläpitotoiminnot ennakoivasti ja oikea-aikaisesti.

[3.]

## 4 Levylämmönvaihdin

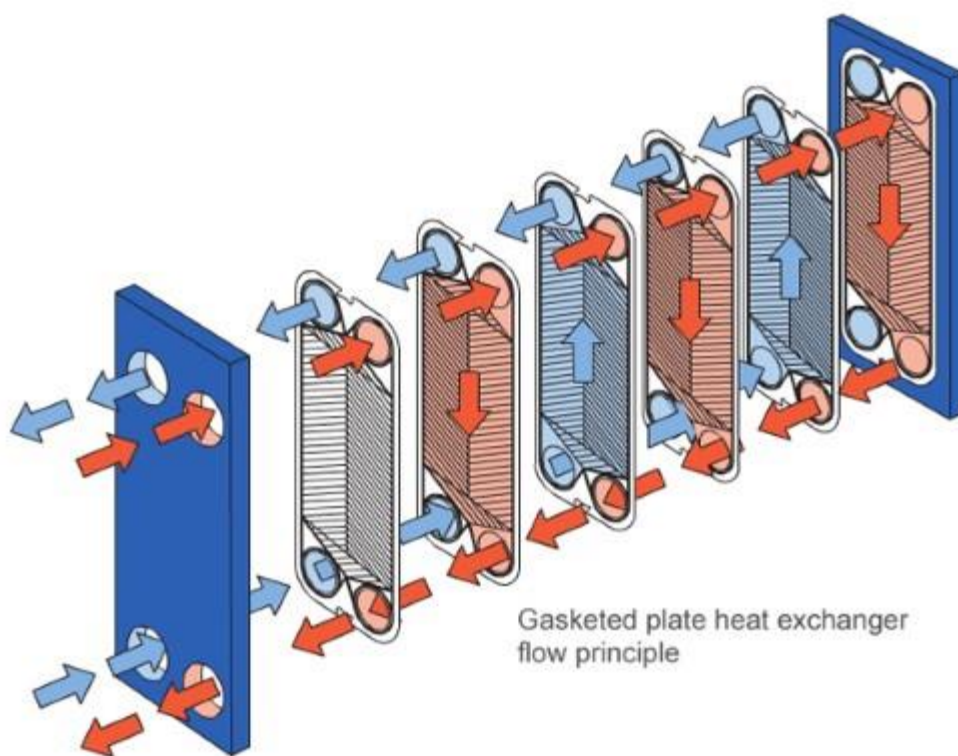
Levylämmönvaihtimet (kuva 1) ovat tehokkaita lämmönsiirtimiä. Niiden rakenne mahdollistaa laajimman lämmönsiirtopinta-alan lämmön siirtämiseen kaasusta tai nesteestä toiseen pienellä painehäviöllä. Ne ovat selkeästi pienempiä kuin saman tehoiset putkilämmönvaihtimet. Levylämmönvaihtimia on kahta eri tyyppiä: kiinteitä ja avattavia. Kiinteät levylämmönvaihtimet on tiivistetty hitsaamalla, juottamalla tai fuusiomenetelmällä ja ne mahdollistavat kovien paineiden, lämpötilojen ja vaativien sisältöjen lämmön siirtämisen. Avattavat levylämmönvaihtimet on tiivistetty elastomeerisilla kumitiivisteillä. Tiivisteellisten lämmönvaihtimien etuna on niiden huollettavuus ja helppo laajennettavuus. [5.]



Kuva 1. Alfa-Lavalin valmistama tiivisteellinen levylämmönvaihdin [5].

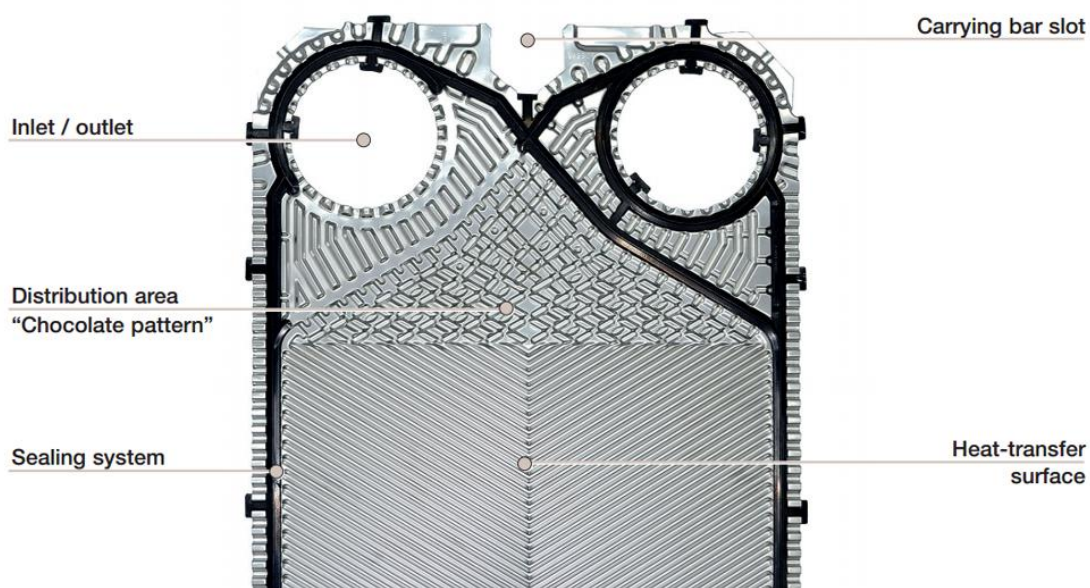
#### 4.1 Toimintaperiaate

Levylämmönvaihdin siirtää lämpöä kaasusta tai nesteestä toiseen kaasuun tai nesteeseen. Eri rakenteet levylämmönvaihtimessa mahdollistavat sen käytön myös kiehuksena tai lauhduttimena. Levylämmönvaihtimessa on kaksi puolta, joista toisella puolella virtaa jäähdyttävä ja toisella puolella jäähdytettävä aine. Virtauskaaviosta (kuva 2) nähdään, kuinka levylämmönvaihtimen lämmönvaihdinlevyjen ja tiivisteiden järjestyksellä virtaus jaetaan lämmönvaihtimen sisällä kahteen eri osioon. Levylämmönvaihtimen suuren lämmönvaihtopinta-alan takia lämpö siirtyy tehokkaasti myös pienillä, jopa alle 1 °C:n lämpötilaeroilla. [5.]



Kuva 2. Levylämmönvaihtimen virtauskaavio [5].

Lämmönvaihdinlevyissä (kuva 3) tärkeimmät osat ovat virtauksenjakoalue, lämmönsiirtoalue, tiiviste sekä lämmönvaihdinlevyn kiinnitysosa. Lämmönvaihdinlevyn kalanruodon muodolla siirrettävään aineeseen saadaan aikaan voimakkaasti pyörteilevä ja turbulenttinen virtaus, joka edesauttaa lämmön siirtymistä aineesta toiseen. Voimakkaasti pyörteilevä ja turbulenttinen virtaus myös edesauttaa vaihtimen pysymistä puhtaana, koska osa liasta irtaantuu itsestään virtauksen mukaan. Levylämmönvaihtimessa joka toinen lämmönvaihdinlevy on asennettu eri päin, jolloin jokaisen levyparin välissä aineet virtaavat eri suuntiin.



Kuva 3. Lämmönvaihdinlevy ja tiiviste [5].

Tiivisteellinen levylämmönvaihdin on huoltoystävällinen, koska se voidaan purkaa paikan päällä ilman erikoistyökaluja. Levylämmönvaihtimen purku tapahtuu löysäämällä levypakan kiristysvaarnat ja vetämällä liikuteltava painelevy asennuskiskoa pitkin taakse (kuva 4). Tämän jälkeen lämmönvaihdinlevyt voidaan huoltaa tarvittavalla tavalla.

[5; 7.]





Kuva 4. Levylämmönvaihdin on avattu huoltoa varten vetämällä liikuteltava painelevy asennuskiskoa pitkin taakse [6].

#### 4.2 Puhdistus, huolto ja kunnossapito

Levylämmönvaihtimien pitäminen puhtaana on ensiarvoisen tärkeää prosessin toiminnan kannalta. Lämmönvaihtimen ei tulisi antaa likaantua niin paljon, että virtaus heikkenee, koska suolaisen meriveden aiheuttama korroosio alkaa helpoiten siinä kohdassa, jossa veden virtaus on pienin. Lämmönvaihtimen likaantuminen aiheuttaa monia ei-toivottuja vaikutuksia kuten:

- riittämätön jäähdytysteho, joka saattaa aiheuttaa tuotantorajoitteita tai vahinkoa prosessissa
- pumppujen tehontarve kasvaa paine-eron kasvusta johtuen
- lämmönvaihtimen nopeampi kuluminen tai jopa vikaantuminen.

Levylämmönvaihtimia voidaan pestä kahdella eri menetelmällä: mekaaninen puhdistus (*on-site* tai *off-site*), eli painepesu ja tarvittaessa harjaus tai CIP-pesu (*Cleaning-In-*



Place), eli kemiallinen kierrätyspesu. Molemmissa pesumenetelmissä on omat hyvät ja huonot puolensa.

**Levylämmönvaihtimen mekaaninen puhdistus** suoritetaan avaamalla levylämmönvaihdin ja puhdistamalla painepesulla ja tarvittaessa harjaamalla lämmönvaihdinlevyt levy kerrallaan. Mekaanisen puhdistuksen hyviä puolia ovat hyvän pesutuloksen varmistus ja lämmönvaihdinlevyjen sekä tiivisteiden kunnon tarkastus. Toisaalta painepesun aikana tiivisteitä saattaa irrota, jolloin ne joudutaan liimaamaan tai kiinnittämään muuten takaisin paikoilleen tiivisteiden tyypistä riippuen. Vaihdinlevyt ja tiivisteet kuluvat myös huomattavasti mekaanisen avauksen yhteydessä, kun lämmönvaihdinlevyjä joudutaan liikuttelemaan kiinnityskiskoa pitkin tai irrottamaan kiinnityskiskosta kokonaan. Vaihdinlevyjen kuluessa kiristysvaiheessa tapahtuva kääremeily (*snaking*)-ilmiö vaikeuttaa tiiveyden saavuttamista. [6.]

**CIP-pesussa** (kuva 5), eli kierrätyspesussa laite pestään kemiallisesti avaamatta sitä. Kierrätyspesumenetelmä on huomattavasti nopeampi ja sen työllistävä vaikutus on pienempi verrattuna mekaaniseen puhdistukseen. Oikein ajoitettu ja suunniteltu kierrätyspesu parantaa lämmönvaihtimen käytettävyyttä sekä vähentää mekaanisia avauskertoja ja varaosien menekkiä huomattavasti.



Kuva 5. Alfa Lavalin CIP-pesulaitteisto [6].

CIP-pesu suoritetaan kierrätyspesulaitteistolla, joka sisältää säiliön, kierrätyspumpun ja lämmityselementin. CIP-pesu sisältää seuraavat vaiheet: lämmönvaihdin erotetaan, tyhjennetään, täytetään pesuliuksella, kierrätetään pesuliuosta tarvittava aika, otetaan pesuliuos talteen ja vaihdin huuhdellaan ja tarvittaessa kuivataan. Pesuliittimet saadaan yhdistettyä lämmönvaihtimen tyhjennys- ja ilmausyhteisiin.

Kierrätyspesun tulokseen vaikuttaa useita tekijöitä:

- pesuliuksen lämpötila
- pesuliuksen vahvuus
- pesuliuksen vaikutusaika
- pesuliuksen virtausnopeus tai paine (abradiivinen tekijä).

Erilaisille saasteille on olemassa eri pesuliukset ja pesutuloksen onnistumisen kannalta on tärkeää tuntea ja tietää, minkälaisien materiaalien ja saasteiden kanssa ollaan tekemisissä. Pesuliuksen tulee poistaa saasteet tehokkaasti lämmönvaihtolevyjen pinnalta, mutta se ei saa vaikuttaa levyjen tiivistemateriaaliin tai itse levyn materiaaliin. Pesuliukset ovat joko vahvoja happoja tai vahvoja emäksiä. Pesuliuksia löytyy esimerkiksi seuraaville saasteille: orgaaniset aineet, metallioksidit, ruosteet, kalsiumkarbonaatti, rasvat, öljyt, sulfaatit. Pesuliuksia käytettäessä tulee huomioida ympäristön turvallisuus ja varmistua asianmukaisesta pesuliuksen neutraloinnista ja kierrätyksestä. Onnistuneen kierrätyspesun edellytys on, että lämmönvaihdinta avattaessa tutustutaan lämmönvaihdinpinnat liianneeseen aineeseen ja otetaan siitä näytteitä. Ainetta analysoimalla voidaan valita oikea pesuliuos kyseisen aineen poistamiseksi.

[6.]

## 5 Jäähdytysvesilaitos 2

### 5.1 Rakenne ja toiminta

Nesteen JÄÄHDVL2 (kuva 6) rakennettiin TL3:lle vuonna 2005 Diesel-projektin myötä, jolloin vanha TL3:n kierto otettiin uuden TL4:n kierroksi. JÄÄHDVL2 otettiin käyttöön toukokuussa 2005.



Kuva 6. Jäähdytysvesilaitos 2.

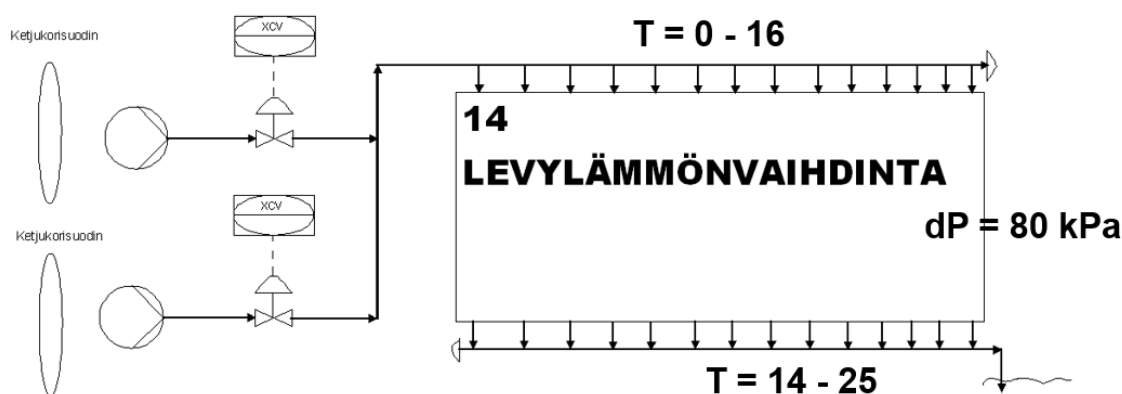
Jäähdytysvesilaitoksen tehtävä on tuottaa jäähdytystehoa TL3- ja NEXBTL-yksiköiden tarpeisiin. Jäähdyttävänä puolena on merivesikierto ja jäähdytettävä puoli on laitoksen kiertovesi. Tärkeimpiä jäähdytettäviä kohteita ovat tuotantolaitoksen tislauksien tislevirtauksien jäähdyttäminen ennen erotussäiliöitä. Jäähdytystehon laskiessa liian alhaiseksi tislauksien ylimenojen arvokkaat kevyet jakeet eivät lauhdu kaasusta nesteeksi erotussäiliössä, vaan menevät kaasuna soihut- ja polttokaasuverkkoon. TL3:n glykolijärjestelmä saa myös jäähdytyksensä kiertovesiverkosta. Glykolijärjestelmä jäähdyttää kaikkia tuotantolinjalla olevia, glykolijärjestelmään kytkettyjä pumppuja ja laitteita, joten järjestelmän kuumentuminen aiheuttaa näiden laitteiden lämpötilan nousua. [16.]

Jäähdytysesilaitoksen tärkeimmät laitteet ovat

- 2 kpl Flowserve BSV 150B -merivesipumppuja
- 3 kpl Sulzer ZXX-70 -kiertovesipumppuja
- 14 kpl merivesivaihtimia, valmistajat Sondex, Alfa Laval.

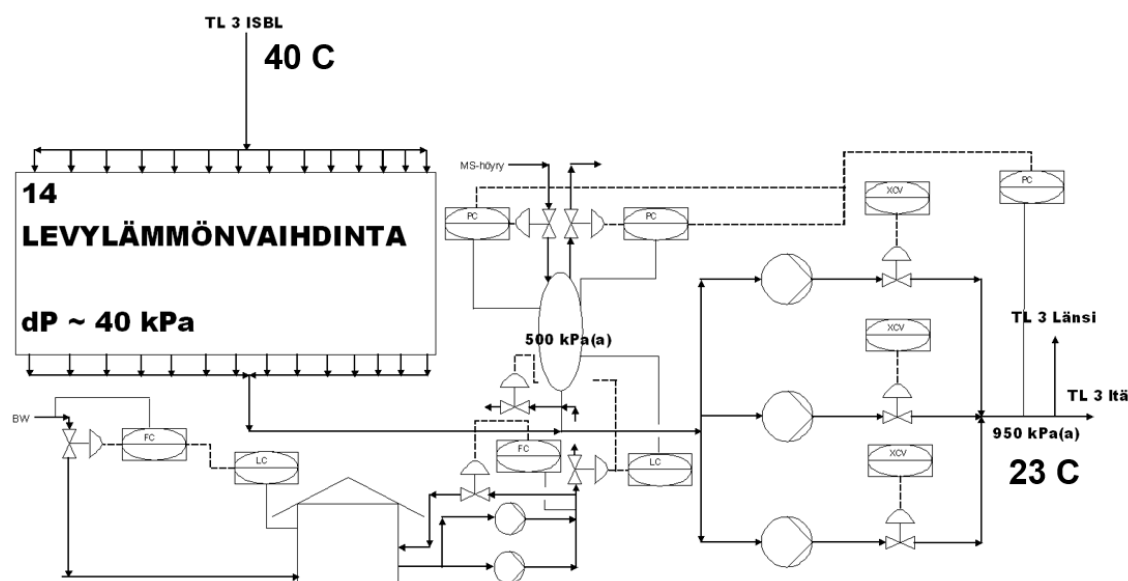
Jäähdytysesilaitokselle tulevan meriveden suodatus tapahtuu ketjukorisuotimilla, joiden suodatusväli on alle 2 mm. Merivesipumput käyvät aina täydellä kierrosnopeudella ja pumpun painepuolen XCV-venttiili on täysin auki pumpun käydessä. Pumppuja käytetään vuorokäytössä. Jäähdytysesilaitoksen levylämmönvaihtimet muodostavat suuren rinnakkaiskytkennän (kuva 7).

[13.]



Kuva 7. Jäähdytysesilaitos 2:n merivesipuolen systeemikuva [13].

Kiertovesipuolen (kuva 8) tärkeimmät laitteet ovat kiertovesipumput, 3 kpl, lisävesisäiliö ja paineistussäiliö. Paineistussäiliö paineistetaan matalapaineisella höyryllä, ja se pitää vakio-paineen pumpun imupuolella. Lisävesisäiliöstä otetaan korvausvesi järjestelmästä poistuneen veden tilalle. Vesi on pääasiassa kattilavettä TL3:lta, mutta myös huoltovettä tai lauhdetta voidaan käyttää hätätilassa. Lisävesisäiliössä on lämmitysmahdollisuus korkeapaineisella höyrykierukalla. Kiertovesipumpuista normaalisti kaksi on käytössä ja yksi varalla. [13.]



Kuva 8. Jäähdytysvesilaitos 2 kiertovesipuolen systeemi [13].

### Sondex S145-IS-16-340-TM

Jäähdytysvesilaitoksessa on 10 kpl Sondex-merkkisiä lämmönvaihtimia. Sondexissa on 340 kpl titaania lämmönvaihtinlevyjä, ja sen jäähdytuspinta-ala on noin 490 m<sup>2</sup> per vaihtin. Yhden Sondex-vaihtimen nimellisteho on 18,9 MW. Sondexissa on ollut suodattimet merivesipuolella likaantumisen vähentämiseksi, mutta ne on poistettu käytöstä laitoksen käynnistyksen jälkeen.

Titaani levy materiaalina on suosittu merivesikäytössä sen erinomaisen korroosionkestävyyden takia, joka on materiaalin pintaan muodostuvan suojaavan oksidikerroksen ansiota.

### Alfa Laval M30-FG

Jäähdytysvesilaitoksessa on 4 kpl Alfa Lavalin merivesivaihtimia. Alfa Lavaleissa on 635 kpl SMO-254 -materiaalista valmistettuja lämmönvaihdinlevyjä, ja niiden lämmönsiirtopinta-ala on noin 1 170 m<sup>2</sup> per vaihdin. Alfa-Lavalin nimellisteho on 29,0 MW.

SMO-254 -materiaali on korkeaseosteinen austeniittinen teräs, joka on kehitetty käytettäväksi merivedessä. Austeniittisten terästen ongelma merivesikäytössä on jännityskorroosio. Se johtuu sisällössä olevista klorideista, jotka voivat aiheuttaa etenkin lämpötilan noustessa jännityskorroosiomurtumisen. Jännityskorroosiossa särön eteneminen ei aiheuta kappaleeseen ulkoisia muutoksia ennen kuin lopullisen murtuman yhteydessä. SMO-materiaalissa jännityskorroosion kestävyyttä on saatu parannettua terästä seostamalla.

Alfa Lavalin ylläpidossa on tärkeää, että vaihdin pidettäisiin mahdollisimman puhtaana. Valmistajan mukaan jännityskorroosiota alkaa muodostua, mikäli merivesipuolen seinämälämmöt nousevat yli 30 °C. Mikäli vaihtimen likaantuminen on runsasta, korroosio alkaa jo alemmissa lämmöissä. Valmistajan mukaan uuden SMO-levyillä varustetun vaihtimen odotettu kestoikä on 2 – 10 vuotta, eikä sille myönnetä minkäänlaisia korroosiotakuita.

[13.]

### 5.2 Vuotuinen kunnossapito

JÄÄHDVL2:n levylämmönvaihtimien vuotuinen kunnossapito aloitetaan keväällä, jotta pesut olisi suoritettu ja jäähdytysvesilaitoksen jäähdytysteho huipussaan loppukesällä, kun ilman ja meriveden lämpötila on korkeimmillaan. Vuosihuoltoon kuuluu lämmönvaihtimien pesu ja tarvittavien mekaanisten putkistokorjausten sekä paikkamaalausten suoritus. Vuosihuollossa lämmönvaihtimien pesu suoritetaan mekaanisesti, jolloin lämmönvaihdin avataan ja pestään levy kerrallaan painepesuna. Joka vuosi vähintään yhteen lämmönvaihtimeen suoritetaan perushuolto, johon kuuluu lämmönvaihdinlevyjen kemiallinen pesu altaassa sekä tiivistesarjan vaihto.

Mekaanisen pesun ongelmia ovat sen hitaus, lämmönvaihdinlevyjen liikuttelusta johtuva korvakkeiden murtuminen ja tiivisteiden irtoaminen painepesun aikana. Vuosittain työmäärä on kasvanut merivesimontussa lämmönvaihdinlevyjen ja niiden tiivisteiden kulumisesta johtuen, koska lämmönvaihdinlevyjen kannakkeita joudutaan oikomaan ja tiivisteitä liimailemaan enemmän. Tiivistesarjojen kunnon heikkenemistä indikoi liiman käytön jatkuva kasvu ja lisääntyneet vuoto-ongelmat vaihtimia käyttöönotettaessa avaamisen jälkeen. Vuoden 2016 vuosihuollosta 2017 vuosihuoltoon verrattuna liimamäärän kasvu on ollut noin 23 %, ja se kasvaa vuosi vuodelta tiivistesarjojen keski-ikä kasvaessa. Työ on myös yksipuolista, toistavaa ja kuluttavaa tekijänsä kannalta.

Tiivistesarjojen vaihtaminen on rajoitettua vaihdon vaatiman ajankäytön vuoksi. Lämmönvaihtimen tiivistesarjan vaihto tulee suunnitella sellaiseen ajankohtaan, että muiden lämmönvaihtimien pesut eivät viivästy jäähdytystehon puutteen vuoksi. Tiivisteiden varastoiminen pitkiksi ajoiksi ei ole järkevää materiaalin vanhenemisen vuoksi, joten tiivistesarjat on tilattava valmistajalta hyvissä ajoin niiden vaihtoa suunnitellessa. Lämmönsiirtolevyjen uusiminen on myös suunniteltava ja perusteltava tarkkaan, koska levypakkojen uusiminen on hyvin suuri kunnossapidon kustannus.

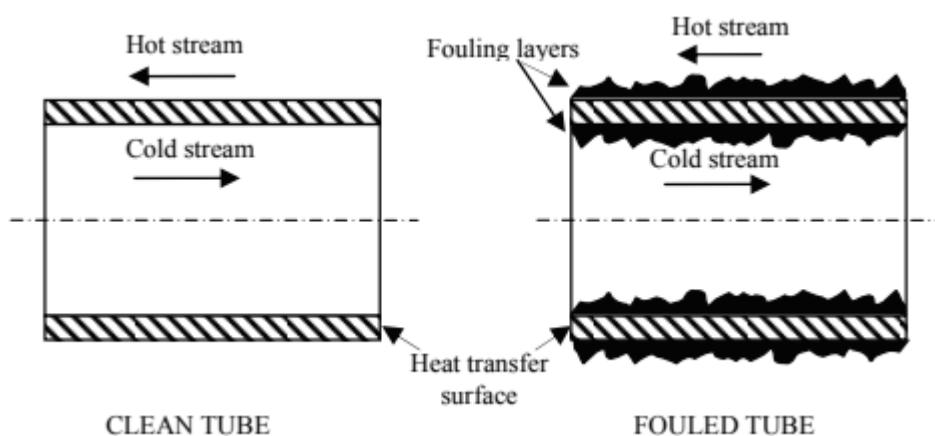
Käyttöinsinöörien Rami Heikkisen ja Marko Jussilan mukaan JÄÄHDVL2:n jäähdytyskapasiteetti on ollut riittävä TL3- ja NEXBTL-yksiköiden tarpeisiin, kun lämmönvaihtimet on pesty mekaanisesti kerran vuodessa. Lämmönvaihtimien pesuja optimoimalla mahdolliset säästöt syntyisivät suorista säästöistä, jotka liittyisivät lämmönvaihtimien varaosiin ja levypakkojen eliniän kasvamiseen. [15; 17.]



## 6 Lämmönsiirron energiatehokkuus

### 6.1 Lämmönvaihtimen likaantuminen

Lämmönvaihtimen likaantumisessa ei-toivotut materiaalit kerääntyvät lämmönvaihtimen lämmönvaihtopinnoille. Lämmönvaihtopinnoilla oleva lika heikentää lämmönvaihtimen lämmönsiirtokykyä heti likaantumisen alusta alkaen jo huomattavasti aikaisemmin, kuin liian määrästä johtuvan tukkeutumisen paine-ero alkaa näkyä. Likaantuminen aiheuttaa eroosiota ja korroosiota paikallisesti nopeutuneen tai hidastuneen virtauksen takia. (Kuva 9.)

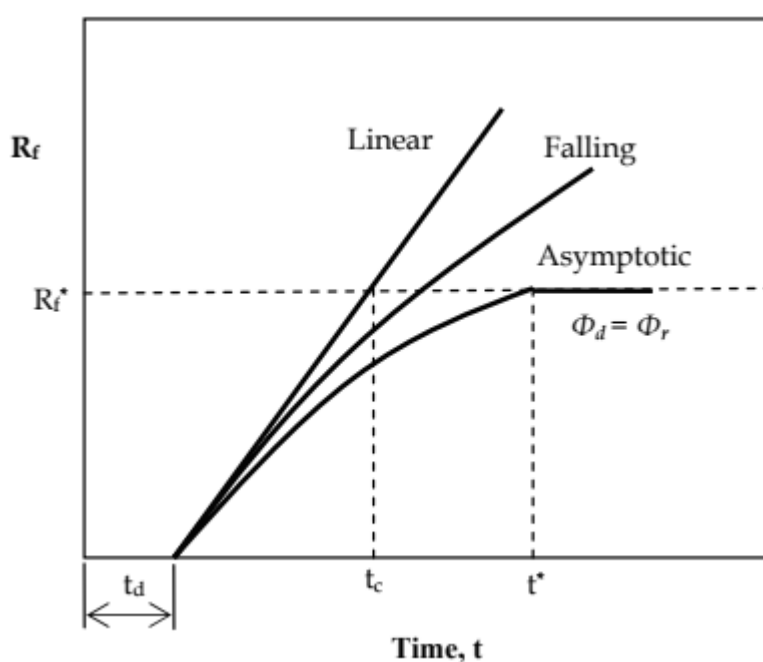


Kuva 9. Lämmönvaihtopintojen likaantumista [9].

Lämmönvaihtimen likaantuessa lämmönvaihtimen virtauskanavien poikkipinta-ala pienenee lämmönvaihtopintojen pintaan kertyvän likakerroksen vuoksi. Poikkipinta-alan pienentyessä vaihtimen läpi kulkevan virtauksen nopeus kasvaa, jolloin jossain vaiheessa virtaus on niin suuri, että sen synnyttämät leikkausvoimat riittävät estämään likaantumisen jatkumisen. Liian korkeat virtausnopeudet aiheuttavat kuitenkin eroosiota lämmönvaihtimessa. Tukkeutuneissa kohdissa hidastuneen tai pysähtyneen virtauksen takia epäpuhtaudet ja sakat jäävät pitkiksi ajoiksi kontaktiin laitteen materiaalin kanssa, mikä aiheuttaa korroosiota.



Likaantumiskäyristä (kuva 10) nähdään **likaantumisen viiveaika**  $t_d$ , jolloin uusi tai uudenveroinen lämmönvaihdin ei likaannu määrittelemättömään aikaan käyttöönoton jälkeen. Likaantumisen viiveaikaan vaikuttavat lämmönsiirtopinnan materiaali, lämmönsiirtopintojen karheus, virtausnopeudet ja lämmönsiirtopintojen lämpötilaerot. Lineaarisesta likaantumiskäyrästä nähdään likaantuminen ilman **likaantumiskerrointa**  $\Phi_d$  ja virtauksen leikkausvoimista johtuvaa **lian poistokerrointa**  $\Phi_r$ . Todellisuudessa lian poistokerroin  $\Phi_r$  kasvaa hiljalleen hidastaen likaantumista, kunnes jossain vaiheessa päästään asymptotiseen tilaan, jossa likaantumiskerroin  $\Phi_d$  sekä lian poistokerroin  $\Phi_r$  ovat yhtä suuria ja systeemin likaantumisen eteneminen on pysähtynyt.



Kuva 10. Lämmönvaihtimen likaantumiskäyrät [9].

Systeemin koosta ja virtauksen jakautumisesta johtuen eri systeemit likaantuvat eri tavoilla. Yksittäisessä putkilämmönvaihtimessa saattaa tukkeutua yksittäisiä putkia, kun taas suuressa lämmönsiirtimien rinnakkainkytkennässä kokonaisia vaihtimia saattaa olla täysin tukkeutunut. Tällaisessa tapauksessa paine-erojen ja korroosion aiheuttamat vaikutukset saattavat aiheuttaa laiterikkoja.

[9.]

## 6.2 Likaantumismekanismit

Seuraavassa on lueteltu tyypilliset likaantumismekanismit, joita monessa tapauksessa voi esiintyä samanaikaisesti:

- **Hiukkaslikaantuminen** on virtaavista aineista lämpöpinnoille kerääntyviä partikkeleita. Näitä voivat olla esimerkiksi korroosiotuotteet, savi- ja mineraalihiukkaset luonnonvesissä, nokihiukkaset savukaasuissa, pölyhiukkaset ilmassa.
- **Saostuminen** tarkoittaa lämpötilan muutoksesta johtuvaa, aineeseen liuenneena olevan aineen saostumista erillämpöisen lämmönvaihdepinnan pintaan. Lämpötilan nousun seurauksena kertyneitä saostumia kutsutaan usein ”kattilakiviksi”, joiden koostumus on kova ja sitkeä. Lämpötilan laskun aiheuttamat saostumat ovat lietteitä, jotka ovat pehmeitä ja puuromaisia. Saostuvista nesteistä esimerkkejä ovat merivesi ja muut suoloja sisältävät liuokset.
- **Kemiallisessa likaantumisessa** virtaavien aineiden sisältämät alkuaineet ja yhdistelmät reagoivat keskenään, ja sen seurauksena muodostuu sakkaa, joka tarttuu lämmönvaihdepinnoille. Lämmönsiirtopinta saattaa toimia reaktiossa katalyyttinä. Öljynjalostuksessa ja petrokemiassa esiintyvät raaka-ainevirrat ovat hyviä esimerkkejä virroista, jotka aiheuttavat kemiallista likaantumista.
- **Korroosiolikaantuminen** on lämmönsiirtopinnan ja virtaavan aineen välillä tapahtuva kemiallinen tai elektrokemiallinen reaktio, jonka seurauksena muodostuu ruostetta. Ruostekerros haittaa lämmönsiirtoa korroosiokohdassa ja aiheuttaa hiukkaslikaantumista muualla prosessissa.
- **Biologinen likaantuminen** on erilaisten makro- ja mikro-organismien kiinnittymistä ja kasvua lämmönsiirtopinnoilla. Mikro-organismeja ovat levät, hiivat, sienet, homeet ja bakteerit. Makro-organismeja ovat simpukat, siimajalkaiset ja kasvillisuus. Likaantuminen näkyy lämmönsiirtopinnassa biofilminä, joka on sitkeä ja tahmea. Esiintyy tyypillisesti lämmönvaihtimissa, joissa käytetään luonnonvesiä.

- **Jähmettyminen** tarkoittaa lämpötilan laskusta johtuvaa aineen sisältämän komponentin jähmettymistä lämmönsiirtopinnalle, esimerkiksi öljynjalostuksessa raskaat pohjatuotteet.

[8.]

Jäähdytysvesilaitoksessa likaantumismekanismit ovat hiukkaslikaantumista ja biologista likaantumista. Meriveden mukana lämmönsiirtopinnoille kulkeutuu suodatuksen jälkeen pieniä määriä simpukoita, jotka jäävät merivesipuolen tulopuolelle. Koko lämmönsiirtopinnat peittyvät biofilmillä ja lämmönvaihtimessa esiintyy pieniä määriä kasvustoa niissä kohdissa, joissa virtaus on keikkein hitain tai virtausta ei ole. (Kuva 11.)



Kuva 11. Vasemmanpuoleisessa kuvassa merivedestä peräisin olevaa biokasvustoa lämmönvaihtimen perällä, jossa virtaus on pieni. Oikeanpuoleisessa kuvassa näkyy biofilmiä ja levää, jota kerääntyy lämmönsiirtopinnoille.

### 6.3 Likaantumisen vähentäminen

Yleisin syy lämmönvaihtimien nopeaan ja ongelmalliseen likaantumiseen ovat ylimitoitettut lämmönvaihtimet. Ylimitoitetussa lämmönvaihtimessa virtausnopeudet ja niiden aiheuttamat leikkausjännitykset eivät nouse riittävän isoiksi, jotta ne riittäisivät irrottamaan kertynyttä likaa ja pitämään lämmönvaihtimen puhtaana pidempään. Lämmönvaihtimien ylimitoitus johtuu huonosta suunnittelusta, jolloin 'varmuuden vuoksi' hankitaan ylimitoitettu vaihdin, minkä seurauksena sekä hankinta-, että huoltokustannukset ovat tarpeettoman suuret.

Lämmönvaihtimia kannattaa ajaa aina täydellä lämpöteholla, jolloin virtausnopeudet pysyvät suurina. Suuret virtausnopeudet ehkäisevät likaantumista ja energiatehokkuuden huonontumista. Liian pienestä virtausnopeudesta kertoo se, että likakerrostuma on samanlainen vaihtimen joka kohdassa.

Mekaanisia menetelmiä likaantumisen ehkäisemiseksi ja vähentämiseksi:

- virtaavan aineen suodattaminen mahdollisimman hyvin
- virtausnopeuden hetkellinen kasvattaminen
- korkeapaineisen kaasun tai höyryn johtaminen lämmönvaihtimeen, mikä aiheuttaa likakerrokseen suuret leikkausvoimat
- turbulenssin kasvattaminen lämmönvaihdinpinoilla
- kierrätysjärjestelmän asentaminen, jolloin järjestelmään laitetaan kiertämään esimerkiksi karkeasta vaahtomuovista valmistettuja puhdistuspalloja.

[8.]

#### 6.4 Lämmönsiirron energiatehokkuuden analysointi

Lämmönvaihtimien energiatehokkuuden luotettava seuranta on erittäin tärkeää, jotta huollot osataan tehdä oikealla menetelmällä oikea-aikaisesti. Seurantajärjestelmä on työkalu, jonka avulla mitatusta datasta voi selvittää syitä vaihtimen huonoon toimintaan ja optimoida vaihtimen ylläpitoa. Useasti lämmönvaihtimien pesuja tehdään turhaan liian usein, jolloin liiallinen huoltotoiminta ja siitä johtuvat pysäytykset aiheuttavat ylimääräisiä kustannuksia. Liian usein suoritetulla pesulla lämmönvaihdin myös kuluu tarpeettomasti. Toinen esimerkki huonosta ylläpidosta on liian harvoin huoltaminen. Tällöin huoltotoimenpiteitä ruvetaan suorittamaan vasta, kun lämmönvaihdin ei enää toimi riittävällä teholla ja tukkeutuminen huomataan prosessin lämpötilojen nousuna hälytysrajojen yli.

Riittämätön jäähdytys- tai lämmitysteho aiheuttaa välittömästi tuotannonrajoitteita tai lämpötehon korvaamista vaihtoehtoisella menetelmällä, esimerkiksi kaasua polttamalla. Lämmönvaihtimen tukkeutuessa tälle tasolle puhdistusta ei todennäköisesti pystytä enää suorittamaan ilman käytöstä poistamista ja mekaanista pesua, jolloin uudelleen toimintaan saattamiseen menee pidempi aika. Mittaroimalla lämmönvaihtimet ja analysoimalla mittaustuloksia lämmönvaihtimen likaantumisen ennustettavuus paranee ja optimaalinen ajankohta lämmönvaihtimen huollolle voidaan suunnitella ennakoon. Lämmönvaihtimen energiatehokkuuden seurannan avulla voidaan myös määrittää sopivin puhdistustapa kyseisellä hetkellä olevan likaantumisasteen mukaan. Avaintunnuslukuja lämmönvaihtimen tehokkuuden seurantaan ovat kriittisenä pidetty lämpötila, lämmönsiirto, painehäviö ja likakerroksen paksuus.

**Lämpötilan analysointimenetelmä** mittaa yksittäistä kriittistä lämpötilaa, kuten jäähdytettävän virran loppulämpötilaa. Etuina ovat helppous ja edullisuus, mutta menetelmä ei korreloi suoraan lämmönvaihtimen likaantumisen ja energiatehokkuuden kanssa. Menetelmä ei huomioi muita lämmönsiirtotehoon vaikuttavia tekijöitä, kuten jäähdyttävän virran lämpötilaa tai jäähdytettävän kierron paluulämpötilaa.

**Lämpötilojen vertailumenetelmä** vertaa kriittisenä pidettyjä lämpötila-arvoja muiden lämpötilojen funktiona, kun lämmönvaihtimen energiatehokkuus on tunnetusti hyvä. Lämmönvaihtimen käyttöjakson aikana poikkeamat valvotuissa olosuhteissa mitatuista lämpötiloista antavat viitteitä energiatehokkuuden heikentymisestä. Menetelmän etuina

ovat yksinkertaisuus, edullisuus ja parempi korrelaatio energiatehokkuuden kanssa pelkään lämpötilan analysointimenetelmään verrattuna. Huonona puolena on, että menetelmä ei ota huomioon kaikkia energiatehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä.

**Painehäviön analysointimenetelmällä** seurataan likaantumisen johtuvan paine-eron kasvamista nestevirran kulkiessa lämmönvaihtimen läpi. Menetelmän etuna on sen helppo toteutettavuus, mutta se ei kerro suoraan energiatehokkuudesta.

**Lämmönsiirron analysointimenetelmä** on ainoa tapa selvittää lämmönvaihtimen läpi kulkeva lämpöteho. Myötä- ja vastavirtalämmönvaihtimissa on mahdollista määrittää logaritminen lämpötilaero, jonka avulla voidaan määrittää kokonaislämmönsiirtokerroin ja arvioida likavastusta. Menetelmällä on hyvät mahdollisuudet havaita likaantuminen ajoissa ja suorittaa huoltotoimenpiteitä ennakoidusti.

Seuraavissa kappaleissa tutustutaan syvällisemmin kahteen menetelmään, joiden avulla JÄÄHDVL2 toimintaa voitaisiin mitata.

[8.]

#### 6.4.1 Lämmönsiirron analysointimenetelmä

Lämmönsiirron analysointimenetelmässä tulee mitata molempien lämmönvaihtimen läpi kulkevien virtojen tulo- sekä menolämpötilat ja toisen virran massavirta. Lämmönvaihtimen läpi siirtyvä teho esitetään kaavassa 1:

(1)

$$\Phi = mc_p \Delta T = U \Delta T_{ln}$$

missä	$\Phi$	on lämpöteho [kW]
	$m$	on jommankumman virtaavan aineen massavirta [kg/s]
	$c_p$	on saman aineen ominaislämpökapasiteetti [J/(kgK)]
	$\Delta T$	on saman ainevirran tulo- ja menolämpötilojen erotus [K]
	$U$	on lämmönvaihtimen kokonaislämmönsiirtokerroin [W/K]
	$\Delta T_{ln}$	on logaritminen lämpötilaero [K]

Logaritmiseen lämpötilaeroon vaikuttavat virtojen keskinäiset lämpötilaerot. Energiategohokkuus on parhaimmillaan, kun kylmän ja kuuman virran lämpötilaero  $\Delta T_{max}$  on mahdollisimman suuri. Logaritminen lämpötilaero riippuu lämmönvaihtimen tyypistä, mutta esimerkiksi myötä- ja vastavirtavaihtimelle sen voi esittää kaavalla 2:

(2)

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

missä  $\Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,o}$  ja  $\Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,i}$

vastavirtaukselle ja

$$\Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,i} \quad \text{ja} \quad \Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,o}$$

myötävirtaukselle. Kuvassa 12 nähdään lämmönsiirto myötä- ja vastavirtaus lämmönsiirtimissä.

Lämmönvaihtimen lämpötehon ja logaritmisen lämpötilaeron laskemisen jälkeen voidaan lämpötehon kaavasta johtaa kokonaislämmönsiirtokertoimen laskemiseksi lauseke, joka esitetään kaavassa 3:

(3)

$$U = \frac{\Phi}{\Delta T_{ln}}$$

Lämmönvaihtimen kokonaislämmönsiirtokertoimen suhteuttaminen lämmönvaihtimen lämmönsiirtopinta-alaan tarkoittaa analyysia ja mahdollistaa erikokoisten lämmönvaihtimien vertailun keskenään, suhteutettu lämmönsiirtokerroin on kaavassa 4:

(4)

$$U_{suht} = \frac{U}{A}$$

missä  $A$  on lämmönvaihtimen lämmönsiirtopintojen pinta-ala [ $m^2$ ]

Hyvä energiatehokkuus vaatii, että kokonaislämmönsiirtokertoimen  $U$  on oltava hyvä. Lämmönsiirtokertoimen arvoihin vaikuttaa lämmönvaihtimissa eniten lämpöpintojen puhdistaus.

Lämmönvaihtimen tehokkuuden teoreettista maksimia on mahdollista arvioida rekuperaatioasteella (kaava 5):

(5)

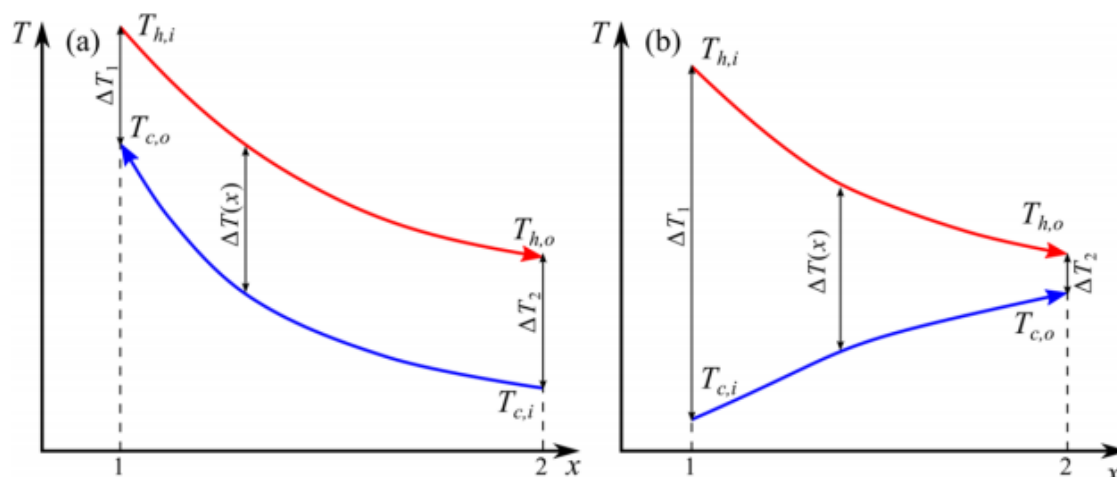
$$\varepsilon = \frac{\Delta T_{max}}{\theta_0}$$

missä  $\varepsilon$  on rekuperaatioaste  
 $\Delta T_{max}$  on suurempi kylmän ja kuuman virran lämpötilamuutoksista [K]  
 $\theta_0$  on suurimman ja pienimmän lämpötilan erotus [K]

Rekuperaatioaste kuvaa paljonko lämpöä on mahdollista saada talteen teoreettisesta maksimista.

[8.]





Kuva 12. Lämmönsiirtoprofiilit vasta- (a) ja myötävirtaus lämmönsiirtimissä (b) [23].

#### 6.4.2 Lämpötilojen vertailumenetelmä

Lämpötilojen vertailumenetelmässä verrataan lämmönvaihtimen läpi kulkevien virtojen lämpötiloja lämmönvaihtimen jälkeen. Lämpötilaeron ollessa pieni voidaan todeta lämmönvaihtimen toimivan hyvällä teholla. Vastavirtavaihtimessa lämpötilaero voi olla myös negatiivinen. Kuva 12 havainnollistaa lämpötilojen vertailumenetelmällä mitattua lämpötilaeroa. Laskentakaava (6) myötä- ja vastavirtausvaihtimelle:

(6)

$$\Delta T = T_{h,o} - T_{c,o}$$

Lämpötilojen vertailumenetelmä ei suoraan kerro lämmönvaihtimen tehosta, mutta vertaamalla lämpötilaeron kehitystä siihen tilanteeseen, kun lämmönvaihdin tunnetusti toimii hyvin, voidaan ennustaa lämmönvaihtopintojen likaantumista ja huoltojen tehokkuutta. Menetelmän etuna verrattuna lämmönsiirron analysointimenetelmään on helpompi ja halvempi toteutus, koska menetelmä ei vaadi virtausmittauksia.

## 7 Instrumentointi

### 7.1 Standardit ja spesifikaatiot

Neste Oyj:llä on omat standardit ja spesifikaatiot, joita sovelletaan NO:n tuotantolaitoksilla, varastoilla sekä satamissa ja jakeluterminaaleissa. Standardisointi kohdistuu asioihin, jotka toistuvat toiminnassa ja niiden tarkoituksena on

- tiedon levittäminen
- koko-, laatu- ym. valikoimien rajoittaminen ja sitä kautta suunnittelun, hankinnan, valmistuksen ja kunnossapidon helpottuminen ja tuottavuuden lisääntyminen sekä varastojen supistuminen ja kustannusten aleneminen
- vaihtokelpoisuuden saavuttaminen
- turvallisten suunnittelu- ja toteutustapojen määrittelemine
- käytön ja kunnossapidon tarpeiden huomioimisen varmistaminen uusissa suunnitelmissa ja asennuksissa (turvallisuus, operoitavuus, luotettavuus, kunnossapito).

Tärkeimpiä NO:n standardeja ovat *Nesteen tekniset spesifikaatiot* ja NOS:it (Neste Oyj standard), joissa määritellään tekniset vaatimukset suunnittelulle ja toteuttamiselle. Nesteen laatujärjestelmässä on ohjeet ja vaatimukset toimintatavoista sekä dokumentoinista.

Nesteen K-spesifikaatiossa eli instrumentoinnin yleisspesifikaatiossa määritellään yleiset instrumentoinnin suunnittelu- ja toteutusvaatimukset, jotka koskevat suunnittelun periaatteita ja perusteita, kojeiden valintaa ja asennusta sekä kaapelointia ja johdotusta.

[11.]

## 7.2 Kenttälaitteiden valinta

Mittarityypin valinta on aina tehtävä mittauskohdan olosuhteiden ja asetettujen vaatimusten mukaisesti. Valinnassa on aina huomioitava yleisiä vaatimuksia kuten tarkkuus, toistuvuus, tilavuusmittauksen soveltuvuus, käytettävyyys ja turvallisuus. Lisäksi on arvioitava prosessiolosuhteiden asettamat vaatimukset kuten lämpötila, paine, kuluttava tai tukkiva aine, viskositeetti, turvallisuus, painehäviö, pienin mitattava virtausmäärä ja alueen laajentamismahdollisuus.

Mittausta valittaessa tulee harkita ensin mittaustapoja, jotka tunnetaan parhaiten ja ovat olleet laajasti ja pitkäaikaisesti käytössä, tai sellaista, joka on ollut käytössä vastaavallisessa kohteessa. Täysin uuden mittaustavan käyttäminen vaatii suunnittelulta enemmän aikaa, jos kokemuksesta tietoa laitteen tai menetelmän soveltuvuudesta ei ole saatavilla. Uudesta menetelmästä on mittarikohtaisesti tarkastettava kaikki tekijät, jotka vaikuttavat mittarityypin valintaan, jotta todetaan mittarin soveltuvuus ja minimoidaan elinkaaren aikaiset kustannukset.

Kenttälaitteiden valinnassa tulee ottaa huomioon olemassa olevat laitteistot. Valitut toimittajat sekä suositellut kenttälaitetyypit on listattu Nesteen ohjeessa ”CR1545 Hyväksytyjen laitevalmistajien luettelo”. Käyttämällä rajattua laitetoimittajamäärää pystytään hallitsemaan suuria laitemääriä paremmin. [14].

Langattomia kenttälaitteita valittaessa tulee huomioida, että laitteet tukevat joko ISA100- tai WirelessHART-protokollaa. Langattomien kenttälaitteiden tulee myös tarvittaessa toimia signaalintoistimina muille langattomille kenttälaitteille. [14].

Yksilöllisen lämmönsiirron analysointimenetelmän toteuttamiseksi jokaiselta vaihtimelta tulee mitata molempien sisäänmenojen ja ulostulojen lämpötilat sekä toisen virtauksen massavirta. Massavirran saamiseksi tulee mitata prosessiputkessa kulkevan nestevirran nopeus, jonka avulla voidaan laskea massavirta, kun tunnetaan prosessiputkiston mitat ja sisältö.

### 7.2.1 Virtausmittaus

Mittauspaikan prosessiolosuhteista johtuen (20" putki, virtausnopeus noin 3 m/s, tilavuusvirta noin 1 500 m<sup>3</sup>/h, sisältö vesi) useat virtausmittaustyytit eivät ole sopivia kohteeseen suuren putkikoon takia. Mittauksilla seurataan lämmönvaihtimen likaantumista johtuvaa tehonalenemaa, joten mittauksessa pitkän ajan keskiarvon muutoksen havaitseminen on oleellisempaa, kuin hetkellinen absoluuttinen arvo. Tästä johtuen myöskään mittaustaajuuden ei tarvitse olla suuri. Mittaukset asennettaisiin jo-olemassa olevaan putkistoon, joten mittaustyytin valinnassa tulee ottaa huomioon mittauksien asentamisesta johtuvien mekaanisten putkistomuutosten kustannukset.

Yleisimpiä virtausmittaustyyttejä ovat:

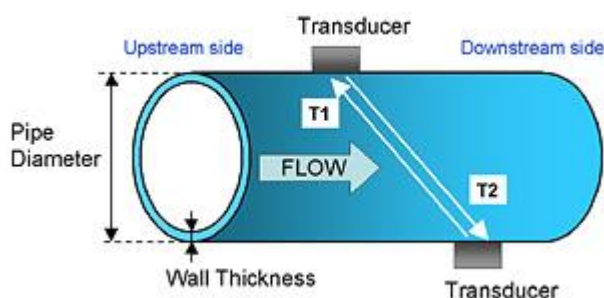
- paine-eroon perustuvat mittaukset
- vortex-mittari
- coriolis-mittari
- soikioratasmittari
- turbiinimittari
- ultraäänimittari
- sähkömagneettinen virtausmittari
- terminen massavirtausmittari
- rotametri.

[12.]

Ultraäänimittaus on sopivin mittaustapa kyseiseen kohteeseen, koska mittaus soveltuu isoille putkien halkaisijoille. Ultraäänimittareita on olemassa kiinteitä sekä Clamp-On -

tyyppisiä, joista tässä sovelluksessa käytettäisiin Clamp-On -tyyppistä mittausta, koska se voidaan asentaa helposti olemassa olevaan putkistoon ilman mekaanisia muutoksia.

Ultraäänimittaus perustuu ultraäänen kuluaikaan virtaavassa aineessa (kuva 13). Ultraäänimittaus asennetaan putken suoralle osuudelle, jossa virtaus on mahdollisimman laminaarinen. Mittauksen tarkkuus paranee, kun anturit on asennettu sellaisen matkan päähän toisistaan, että ultraääni kimpoaa putken seinämistä useamman kerran. [1.]



Kuva 13. Ultraäänellä toimivan virtausmittauksen toimintaperiaate [1].

### 7.2.2 Lämpötilamittaus

Lämpötilamittaukset on mahdollista toteuttaa joko pinta-asenteisilla lämpötila-antureilla tai lämpötaskuihin asennettavilla lämpöantureilla.

Nesteen instrumentoinnin yleisspesifikaation mukaan lämpötilamittaukset suoritetaan käyttämällä ensisijaisesti Pt100 vastusantureita. Haastavissa olosuhteissa, kuten jatkuva lämpötila yli 450 °C tai suuri värinä, on käytettävä olosuhteisiin soveltuvaa termoparia. Vastus- tai termopariviesti muutetaan anturin kytkentärasiaan tai kentälle sijoitettavan lähettimen avulla standardivirtaviestiksi 4 – 20 mA. Termopariviestin ja virtaviestin välillä on oltava galvaaninen erotus.

Pt100 vastusanturien on oltava nopeatoimisia, täysin suojattuja ja haponkestävästä teräksestä (AISI 316) valmistetun vaipan sisään sijoitettuja ja niiden on oltava värinän ja iskun kestäviä sekä anturin vaipasta sähköisesti eristettyä tyyppiä. Lämpömittausanturit asennetaan Nesteen H-spesifikaation NP1-4060 mukaisiin lämpömittaussuojaputkiin, jotka kiinnitetään prosessiputkeen tai -säiliöön erillisellä asennuslaipalla.

Lämpötilamittauspiirien suunnittelussa ja anturien valinnassa on kiinnitettävä erityistä huomiota piirien sähköiseen rakenteeseen. Luonnostaan vaarattomien piirien (EXi) mittauksen onnistumiselle on tärkeää, että helposti syntyvät maavirtapiikit estetään sopivin keinoin.

[12.]

### 7.3 Mittauksen tie automaatiojärjestelmään

#### 7.3.1 Langallinen kenttälaite

Langallisten kenttälaitteiden analogisten milliampeeriviestien ja digitaalisten viestien siirtoon sekä kenttälaitteiden tehonsyöttöön käytettäviin kaapelointeihin ja kytkentöihin liittyvät suunnittelu- ja toteutusvaatimukset on kuvattu ja ohjeistettu Neste Oyj:n spesifikaatiossa K-122. Kaapelointijärjestelmän periaatteena on kaapelimäärien minimointi kentän ja kytkentähuoneen välillä sekä kytkentähuoneen sisäisessä kaapeloinnissa.

Yksittäisten kenttälaitteiden kenttäkaapelointi yhdistetään kenttäkytkentäkoteloiissa (kuva 14) monijohtimisiin runkokaapeleihin (kuva 14). Runkokaapeli kulkee kenttäkytkentäkotelosta kytkentähuoneeseen (kuva 15), jossa runkokaapelit päätetään ristikykentäkaappeihin (kuva 16). Ristikykentäkaapeista viesti kulkee automaatiojärjestelmiin I/O-korttien (kuva 16) kautta.

Tehonsyöttökaapelit on pidettävä erillään mittaus- ja säätöviesteistä häiriöiden estämiseksi. Kaapelit vedetään kenttäkojeille samoissa kaapelikanavissa runkokaapelien kanssa. Kentällä viesti- ja tehonsyöttökaapelit asennetaan samoilta kaapelihyllyille, mutta kytkentähuonerakennuksessa viesti- ja tehonsyöttökaapelit asennetaan eri kaapelihyllyille. Ohjeelliset minimietäisyydet viesti- ja tehonsyöttökaapeleiden välille jännitteiden mukaan on määritelty Neste Oyj:n spesifikaatiossa K-122 sivulla 14.

[19.]



Kuva 14. Vasemmanpuoleisessa kuvassa on kenttäkytkentäkotelo ja oikeanpuoleisessa kuvassa runkokaapeleita.



Kuva 15. Vasemmanpuoleisessa kuvassa näkyy kytkentähuonerakennus. KytKentähuoneessa on ristikytKentäkaapit, jotka näkyvät oikeanpuoleisessa kuvassa.



Kuva 16. RistikytKentäkaapista signaalit viedään tiedonsiirtokaapelilla vasemmassa kuvassa olevaan jakokaappiin, josta ne jaetaan oikeanpuoleisessa kuvassa näkyville I/O-korteille.



### 7.3.2 Langaton kenttälaite

Kiinteästi asennetun langattoman kenttälaitteen signaalit viedään kunnonvalvonta- ja hajautettuihin automaatiojärjestelmiin (CMS, DCS). Automaatiojärjestelmään viedään vähintään mitattavan suureen arvo tai tilatieto ja langattomista kenttälaitteista akkujen jännite. Langattomien kenttälaitteiden akkujen alhaisesta jännitteestä muodostetaan aina hälytys DCS:ään. Lisäksi langattomista laitteista järjestelmään voidaan viedä akun varaustaso, signaalin voimakkuus ja muut tiedot, jotka kenttälaitteesta on saatavilla. Siirrettävien langattomien kenttälaitteiden signaalit viedään aina yhteen ja samaan automaatiojärjestelmään. Automaatiojärjestelmästä ne viedään TOPiin. Tarvittaessa mitaustiedot voidaan välittää myös muihin automaatiojärjestelmiin esimerkiksi silloin, kun mittauksesta halutaan tehdä hälytys. [14.]

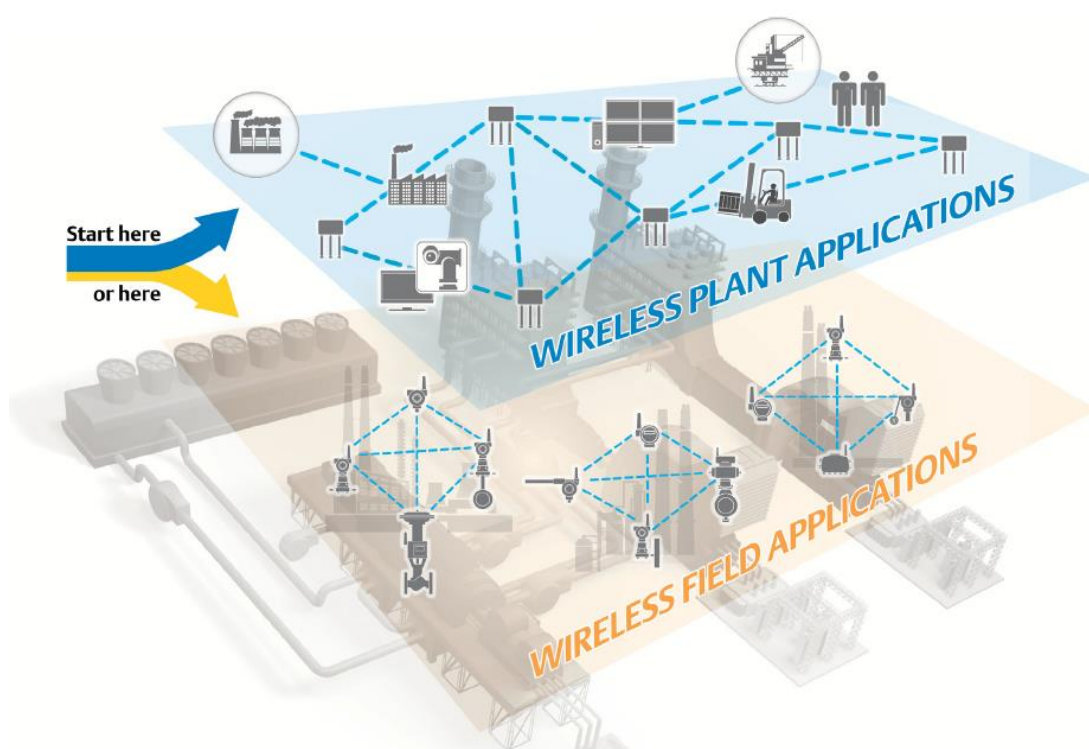
Langaton kenttälaite (kuva 17) ei vaadi mitään johdotuksia prosessialueella. Laite saa virransyöttönsä siihen sijoitetusta akusta. Akun kestoikää voi arvioida laitevalmistajien sivustoilla olevilla laskureilla. Kestoikään vaikuttaa oleellisesti tarvittava mittaustaajuus. Tässä työssä suunniteltavassa kunnonseurantajärjestelmässä pitkän ajan prosessiarvojen muutos on olennaisin mitattava ja seurattava arvo, joka voidaan mitata esimerkiksi 60 sekunnin mittaustaajuudella. Tällaiselle mittaustaajuudelle anturivalmistajat lupaavat jopa 10 vuoden akunkeston. [20.]



Kuva 17. Langaton kenttälaite. Kuvassa oleva kenttälaite on varustettu näytöllä, jolloin paikallinen luettavuus säilytetään. [22.]



Kattava langaton mesh -verkko rakentuu prosessialueelle tukiasemien ja signaalintoistimien avulla. Langattomat kenttälaitteet toimivat signaalintoistimina, joten mitä enemmän langattomia laitteita prosessialueella on käytössä, sitä kattavampi langaton verkko muodostuu. Langatonta kenttälaittejärjestelmää voi suunnitella kahdella periaatteella: luoda ensin koko laitoksen kattavan verkon erillisten tukiasemien avulla, tai asentaa tarvittavat langattomat mittaukset, jotka toimivat itsessään signaalintoistimina ja laajentaa verkon kattavuutta tukiasemilla tarpeen mukaan. [22.] (Kuva 18.)

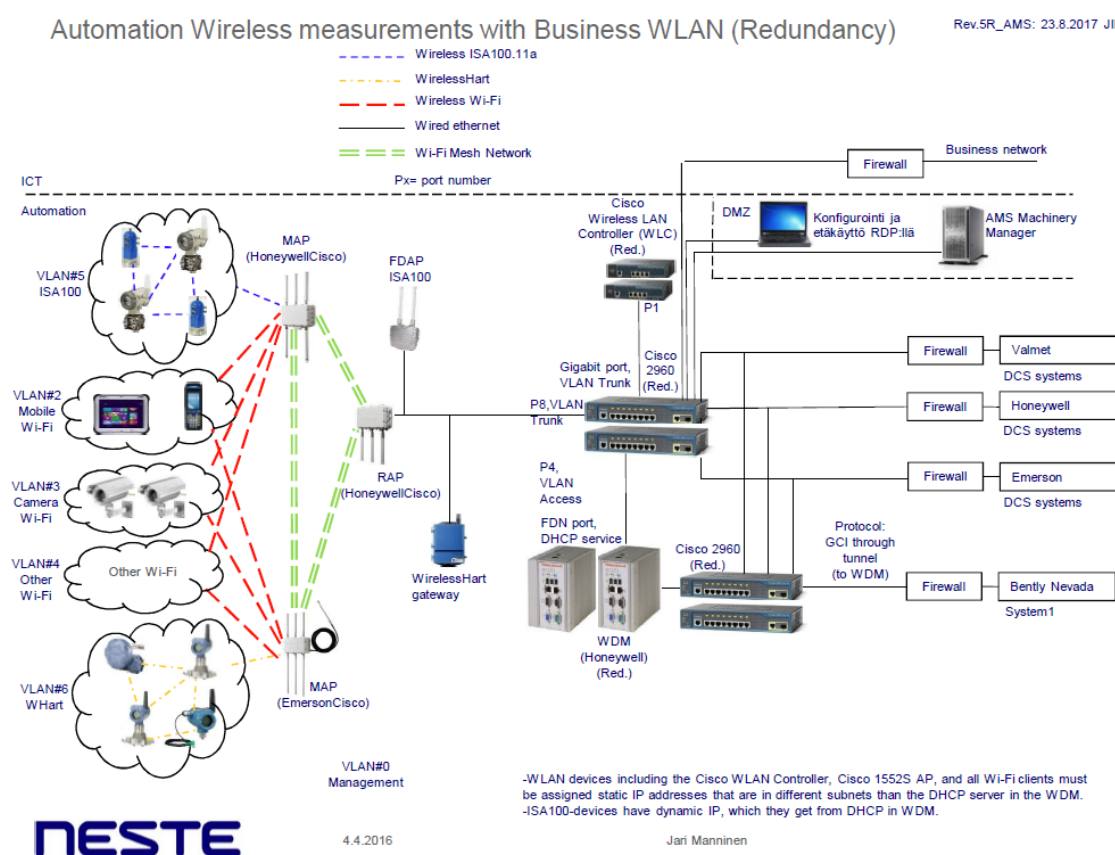


Kuva 18. Langattoman kenttälaitteverkon suunnittelun eri mahdollisuuksia [22].

Suositellaan, että yksi kenttälaitte voi toimia signaalintoistimena enintään neljälle muulle laitteelle. Signaalintoistimen kantama on noin 150 m, kun kenttälaitteiden välillä on näköyhteys. Yhteen tukiasemaan voi liittyä noin 80 kenttälaitetta, joista tieto viedään eteenpäin Ethernet- tai valokuitukaapelilla etäisyydestä riippuen. Tukiasema tarvitsee myös virransyötön.

Langattomat viestisignaalit kootaan ja viedään langalliseen automaatiojärjestelmään reitittimen, palomuurin ja liikenneaseman kautta (kuva 19). Langaton järjestelmä säästää tilaa ja kustannuksia verrattuna langalliseen järjestelmään, koska kaapelikanavien, kytkentäkaappien ja kytkentätilojen määrä laajennusten yhteydessä vähenee merkittävästi verrattuna langalliseen järjestelmään.

[21.]



Kuva 19. Langattoman kenttälaiteverkon verkkotopologia [21].

## Huomioitavaa langattomasta kenttälaitteverkosta

Nesteen ohje ”CR-1586 Suunnitteluohje langattomalle kenttälaitteverkolle ja langattomille kenttälaitteille” antaa yleiset ohjeet instrumentointi- ja automaatio suunnittelijalle suunnitella langattomia kenttälaitteita sekä langatonta kenttälaitteverkkoa. Ohjeessa kuvattuja teknisiä vaatimuksia tulee soveltaa langattomissa kenttälaitteverkoissa Nesteen automaatiojärjestelmässä.

Ohjeessa CR-1586 määritellään, että langattomia kenttälaitteita ja langatonta järjestelmää ei tule käyttää kriittisissä mittauksissa, eli mittauksissa jotka liittyvät prosessinohjaukseen. Langattomat kenttälaitteet ja langaton kenttälaitteverkko soveltuu hyvin käytettäväksi kunnonvalvontajärjestelmissä helpon asennuksen ja langattomien antureiden joustavan sijoittelun vuoksi. Nesteen langaton kenttälaitteverkko tukee langattomien kenttälaitteiden verkkostandardeja: WirelessHART (IEC 62591), ISA100 (IEC 62734) ja Wi-Fi (IEEE802.11 a/b/g/n).

Langaton tietoliikenne on altis ulkopuolisille häiriöille, eikä signaalin häiritsemistä voi täysin sulkea pois. Tästä johtuen langattoman kenttälaitteverkon on oltava oma itsenäinen verkkonsa, joka on suojattu palomuurein muihin järjestelmiin. Laitteet, jotka noudattavat langattomien prosessiautomaatiolaitteiden WirelessHART (IEC 62591) tai ISA100 (IEC 62734) standardeja, sisältävät kehittyneen salatun tietoturvan. Molempien standardien protokollat soveltavat vahvaa 128 bittistä salausta useiden salausavaimien avulla, jotka tukevat salausavaimen kierrätystä.

Kiinteästi asennettavat langattomat kenttälaitteet esitetään PI-kaavioissa tavanomaisesti, mutta piirisymbolin välittömään läheisyyteen lisätään ”WIRELESS”-teksti. Tällöin PI-kaaviosta nähdään suoraan, että kyseessä on langaton kenttälaitte, jota ei tule käyttää prosessinohjaukseen.

Nesteen ohjeessa CR-1586 on määritetty tarkemmat ohjeet suunnittelutyön kulusta ja dokumentaatiosta.

[14.]

### Mittalaitteiden elinkaaren hallinta

Suunnittelussa tulee selvittää verkkolaitteiden oletettu elinkaari. Laitteista tulee kirjata ylös seuraavia asioita verkkolaitelistaan:

- käyttöönottopäivämäärä
- oletettu käyttöikä (laitetoimittajalta)
- asennettu ohjelmistoversio (laitetoimittajalta)
- oletettu ohjelmistojen päivitysväli (laitetoimittajalta).

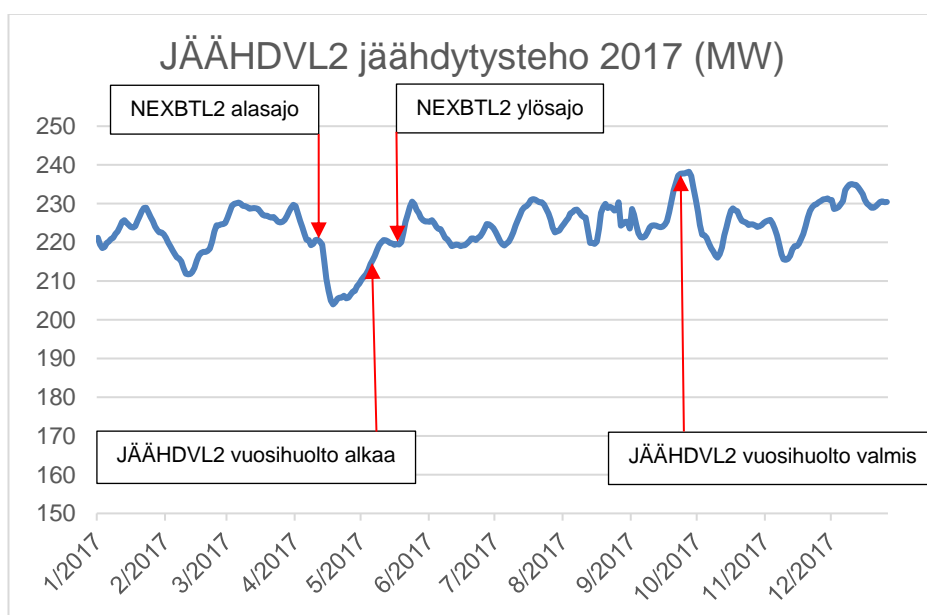
Käyttöönotettujen laitteiden laitetiedot syötetään Nesteen M+ kunnossapitojärjestelmään.

[14.]

## 8 Jäähdytysvesilaitos 2:n analyysi

JÄÄHDVL2 lämmönvaihtimien rinnakkaiskytkennän tehoa ja lämmönsiirtokykyä on mahdollista mitata ja analysoida olemassa olevilla mittauksilla, joita ovat meriveden ja prosessiveden sisään- ja ulostulolämpötilat sekä näiden virtausmittaukset. Näiden mittauksen avulla yksittäisten vaihtimien kuntoa ei voi arvioida.

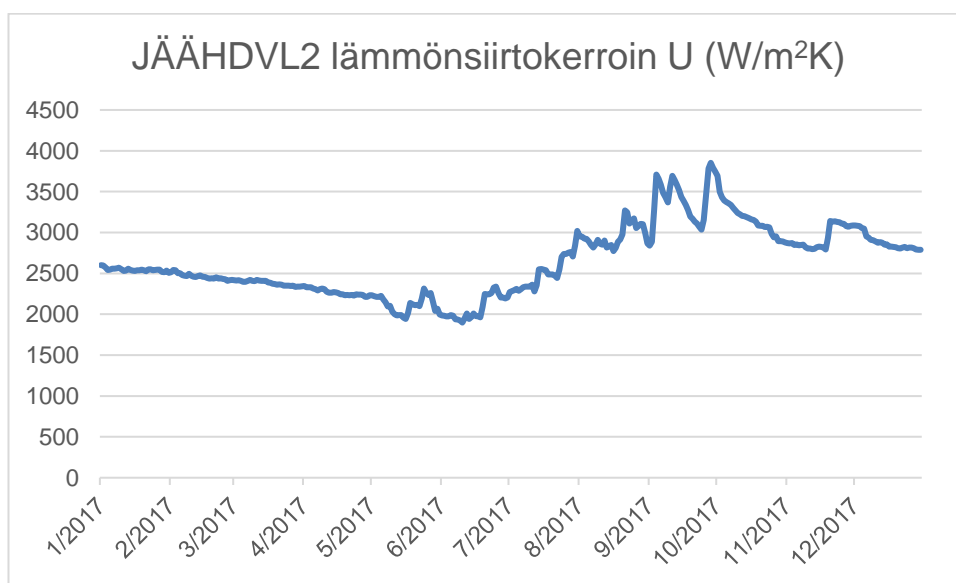
Jäähdytysvesilaitoksen kokonaistehokäyrästä (kuva 20) nähdään TL3:n yksikköseisokit vähentyneenä tehontarpeena. Vuosihuoltojen aikana tehokäyrä pysyy tavanomaisen vaihtelun sisällä, josta voidaan päätellä, että käytössä olevien vaihtimien jäähdytysteho riittää kattamaan tuotantolinjan jäähdytystarpeen.



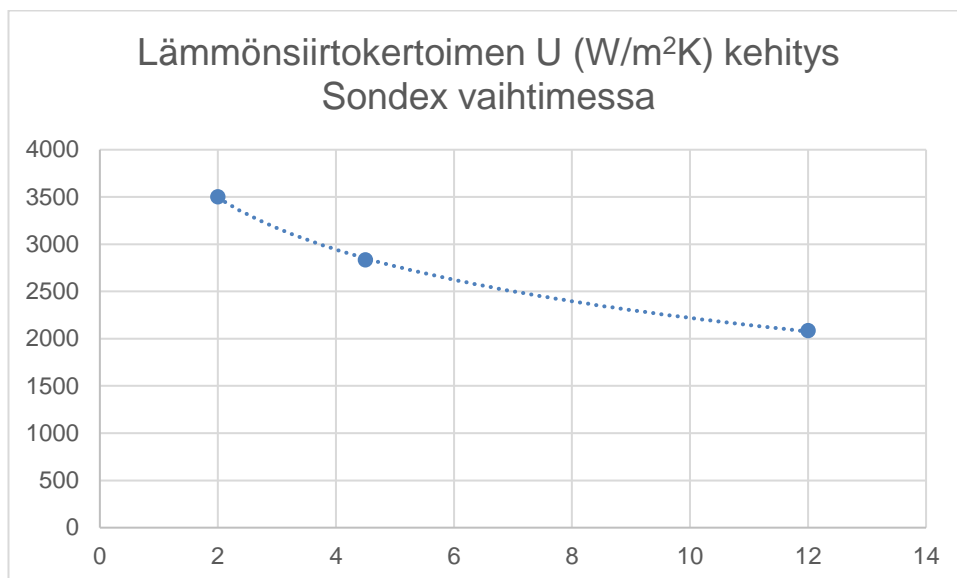
Kuva 20. Jäähdytysvesilaitos 2:n tehokäyrä vuodelta 2017. Pystyrivin yksikkö on JÄÄHDVL2 kokonaisteho (MW) ja vaakarivillä kuukaudet.

## 8.1 Lämmönsiirron analysointimenetelmä

Kuva 21 havainnollistaa vuosihuoltojen vaikutusta lämmönsiirtokerrotimeen. Lämmönsiirtokerroin kertoo suoraan lämmönvaihtimien likaisuudesta. Lämmönvaihtimien likaantuminen on nopeimmillaan silloin, kun meriveden lämpötila ja merivedessä olevan levän ja kasvuston määrä on suurimmillaan. Yksiköllisen lämmönsiirron analysointimenetelmän avulla jokaiselle lämmönvaihtimelle voitaisiin määrittää oma lämmönsiirtokerroin, jolloin pesujärjestystä voitaisiin optimoida ja pestä niitä vaihtimia, jotka ovat likaantuneet eniten. Pesut voitaisiin myös ajoittaa sellaiseen ajankohtaan, missä lämmönvaihdin ei ole vielä niin likainen, ettei sitä voitaisi pestä kevyemmillä kemiallisilla pesumenetelmillä. Syksyllä 2017 suoritettiin kannettavalla laitteistolla koemittauksia yksilöllisen lämmönsiirron seuraamiseksi ja koemittauksista saadun mittausdatan avulla voidaan tehdä yksilöllisen lämmönsiirtokerroimen seuraamiseksi suuntaa-antava mittari, jota havainnollistetaan kuvassa 22.



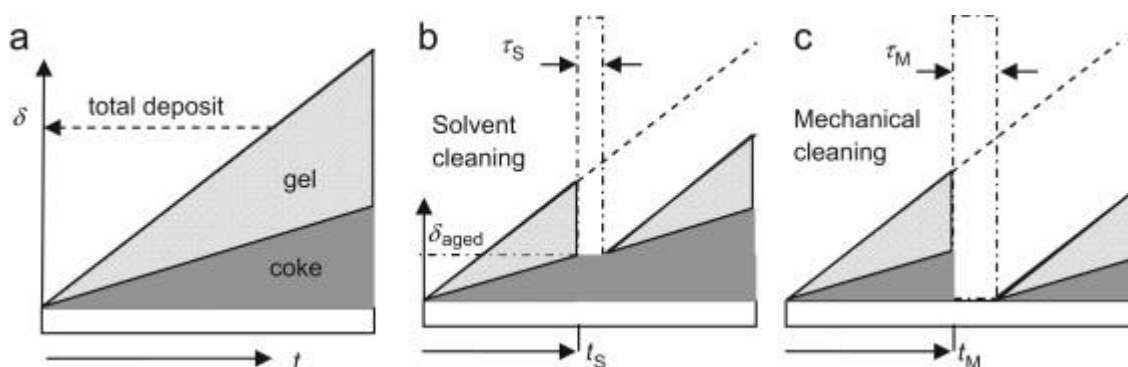
Kuva 21. Jäähdytysvesilaitoksen koko systeemin lämmönsiirtokerroin U laskettu lämmönsiirron analysointimenetelmällä. Pystyrivillä on JÄÄHDVL2 kokonaislämmönsiirtokerroin U (W/m²K). Vaakarivillä kuukaudet.



Kuva 22. Lämmönsiirtokertoimen kehitys Sondex-merkkisessä lämmönvaihtimessa. Pystyrivin yksikkö on lämmönsiirtokerroin  $U$  ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ). Vaakarivin yksikkö on lämmönvaihtimen käytössäoloaika kuukausina.

Mittaukset on toteutettu ottamalla mittauksia jäähdytysvesilaitoksen rinnakkaiskytkennässä olevista, eri aikaan pestyistä lämmönvaihtimista. Tällä tavalla saatiin suuntaa-antavia mittausarvoja, joilla voidaan arvioida yksittäisen lämmönvaihtimen lämmönsiirtokertoimen ja likaantumisen kehitystä. Mittaroimalla jokainen lämmönvaihdin saataisiin kaikista jäähdytysvesilaitoksella olevista lämmönvaihtimista samanlainen mittari lämmönsiirtokertoimelle. Lämmönsiirtokerroinkäyrää seuraamalla on mahdollista optimoida pesujen ajankohta ja menetelmä.

Lämmönsiirtokertoimen palautumisesta alkuperäiselle tasolle pesun jälkeen voidaan myös arvioida erityisesti kierrätyspesun onnistuminen ja lämmönvaihdinpinnoille kertyneen kiinteän sakan tai koksen määrä (kuva 23). Koksaantuminen ei kuitenkaan ole tyyppinen likaantumismuoto merivesivaihtimissa, vaan liasta valtaosa on pehmeää lietettä, joka liukenee pesuliuokseen. Pesemällä lämmönvaihtimet kierrätyspesulla oikea-aikaisesti, saadaan meriveden kuljettama lima ja levä poistettua lämmönsiirtopinnoilta ennen, kuin lämmönvaihdin tukkeutuu liikaa eikä pesuliuos pääse vaikuttamaan joka paikkaan.



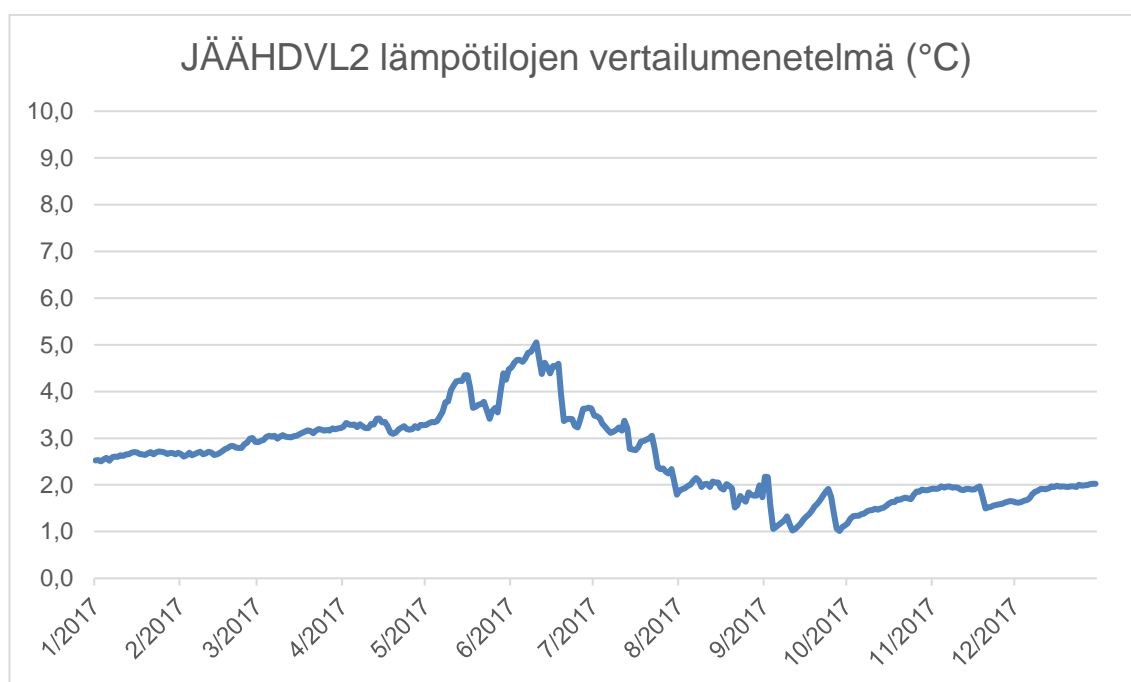
Kuva 23. Eri likaantumismekanismeilla tapahtuvan likakerroksen tyyppi (A), liuotuspesun vaikutus (B), mekaanisen pesun vaikutus (C) [18].

Lämmönsiirron analysointimenetelmällä saadaan kattavasti mitattua ja analysoitua lämmönvaihtimen toimintaa. Virtausnopeuksia seuraamalla voidaan nähdä kokonaisvirtauksen jakaantuminen rinnakkainkytkennässä oleviin vaihtimiin, mistä voi myös arvioida yksittäisten vaihtimien toimivuutta ja tietoisuus koko järjestelmän toiminnasta paranee.



## 8.2 Lämpötilojen vertailumenetelmä

Vertaamalla lämpötilojen vertailumenetelmällä laskettua mittaria (kuva 24) lämmönsiirron analysointimenetelmällä (kuva 21) laskettuun lämmönsiirtokertoimen kehitykseen, voi nähdä suoran korrelaation näiden menetelmien välillä. Lämpötilojen vertailumenetelmällä voidaan arvioida lämmönvaihtimen likaantumista ja kokemuksen perusteella päätellä, milloin lämmönvaihdin toimii riittävällä teholla. Lämpötilojen muutoksesta huoltojen yhteydessä voidaan myös todentaa huollon onnistuminen ja nähdä eri huoltotapojen vaikutus likaantumisen uusiutumiseen.



Kuva 24. Jäähdytysvesilaitoksen koko systeemi analysoitu lämpötilojen vertailumenetelmällä.

## 9 Investointilaskelma

Investoinnin kannattavuuslaskelma on investoinnin pitoajalle ulottuva laskelma, jonka tarkoituksena on selvittää investoinnin järkevyys ja kannattavuus. Investointilaskelman avulla voi asettaa eri investointivaihtoehtoja paremmuusjärjestykseen. Laskelma lisää tietoisuutta koko projektin laajuudesta, koska sen aikana kiinnitetään huomiota toteutuskustannuksiin, mahdollisiin tuottoihin ja eri riskeihin. Investointilaskelmaa tehtäessä saatetaan usein päätyä alkuperäistä ajattelumallia parempaan lopputulokseen. Investoinnin kannattavuutta voidaan arvioida nykyarvo-, annuiteetti-, sisäisen korkokannan-, pääoman tuottoaste-, tai takaisinmaksuajan menetelmällä. Investoinnin kannattavuuslaskelmat kannattaa suorittaa usealla menetelmällä, jotta tietoisuus kannattavuudesta olisi mahdollisimman hyvä investointipäätöstä tehdessä. [24.]

Investointilaskelmaa aloittaessa tulee selvittää laskennan lähtöarvot, joita ovat muun muassa hankkeen kokonaiskustannukset, investoinnista vuosittain syntyvät tuotot, investoinnista syntyvät kulut, laskentakorkokanta, investoinnin pitoaika ja investoinnin jäännösarvo.

Tässä insinööriyössä tehdyssä investointilaskelmassa on arvioitu automaatiomuutoksen mahdollistaman vuosihuoltojen muutoksen avulla saavutettuja säästöjä. Automaatiomuutoksen avulla lämmönvaihtimien pesumenetelmiä voidaan kehittää, koska sen avulla voidaan todentaa uuden menetelmän toimivuus ja tehokkuus. Lämmönvaihdinten huoltoja optimoimalla voidaan pienentää vuosihuoltojen kustannuksia, lämmönvaihdinten kulumista ja vuosihuoltoihin käytettyä työaikaa sekä lisätä jäähdytysvesilaitoksen luotettavuutta.

Vuosihuoltojen ja laitteiston kulumisen aiheuttamista kustannuksista saavutetulla säästöllä on arvioitu takaisinmaksuaikaa automaatiomuutokselle. Investointilaskelma on tilaajan pyynnöstä salattu omaan liitteeseensä (liite 1).

## 10 Vuosihuoltojen toimintamallin muutos

### 10.1 Tarve muutokselle

Vuosihuoltojen toimintamallia muuttamalla ja vaihtoehtoisia pesumenetelmiä käyttämällä on mahdollista vähentää lämmönvaihtimen avauskertoja. Niiden vähentäminen pienentää levylämmönvaihtimen tiivistesarjojen sekä lämmönvaihdinlevyjen kulumista. Levylämmönvaihtimen purkamisessa on aina omat riskinsä vaihdinta uudelleen käyttöönotettaessa, jolloin saattaa ilmetä vuotoja. Ne johtuvat tiivisteiden mekaanisista vaurioista, roskista tiivistepinnoilla tai tiivistemateriaalin vanhenemisesta, eli elastisuuden katoamisesta. Lämmönvaihdinlevyjä liikuteltaessa niiden kannatinkorvakkeet kuluvat ja saattavat vääntyä, jolloin vaihdinta kiristettäessä levypakka ei enää asetu kiristyksessä suoraan. Levylämmönvaihdinten vanhetessa käyttöönoton yhteydessä tapahtuvat vuodot aiheuttavat huomattavan lisätyön osuuden itse pesutapahtumaan verrattuna. JÄÄHDVL2 vaihdinten ja niiden varaosien kulumisesta johtuvat ongelmat käyttöönottojen yhteydessä ovat lisänneet vuosihuoltojen työmäärää 49 % verrattuna siihen, kun lämmönvaihtimet olivat uusia.

Kemiallisia CIP-kierrätyspesumenetelmiä käyttämällä lämmönvaihtimen avauskerrat voidaan vähentää murto-osaan verrattuna siihen, että niitä pestäisiin aina mekaanisilla pesuilla. CIP-pesuissa lämmönvaihtimen lämmönsiirtokyky palautetaan puhtaan vaihtimen tasolle. Kierrätyspesumenetelmät ovat myös huomattavasti turvallisempia verrattuna mekaanisiin korkeapainepesuihin. Kierrätyspesumenetelmällä lämmönvaihdinta ei tarvitse avata tai purkaa, jolloin käytettävyyssriski on myös pienempi, koska lämmönvaihdin voidaan tarvittaessa ottaa nopeasti takaisin linjaan esimerkiksi yllättävän prosessimuutoksen tai muuttuneen lämmönsiirtotarpeen mukaan. Käyttöönotettaessa vuodoista johtuvat ongelmat ja lisätyöt vähentyisivät, koska lämmönvaihdinta ei tarvitse avata ja pesuliuokset ovat turvallisia tiivistemateriaaleille. Kunnonseurantajärjestelmän avulla vaihtimen jäähdytystehon palautuminen voitaisiin todentaa ja pitkän ajan trendiä seuraamalla voidaan optimoida ajankohta ja menetelmä, milloin seuraava pesu kannattaa suorittaa.

## 10.2 Ehdotus vuosihuoltojen toimintatapamuutoksesta

**Vuosittain vaihtuvassa toimintamallissa** lämmönvaihtimen pesumenetelmää vaihdetaan joka toinen vuosi, eli lämmönvaihdinta pestäisiin vuorotellen mekaanisilla pesuilla ja CIP-pesuilla. Pesumenetelmä suoritetaan siten, että puolet JÄÄHDVL2:n lämmönvaihtimista pestään kierrätyspesuin ja toinen puoli CIP-pesuilla. Tällä järjestelyllä saadaan ylläpidettyä ja varmistettua riittävä jäähdytysteho. Toimintamallilla lämmönvaihtimien avauskerrat jäisivät puoleen nykyiseen huoltotottumukseen verrattuna.

**Seisokkivälin kestävässä toimintamallissa** lämmönvaihtimia pestään pääsääntöisesti CIP-pesuilla ja kerran seisokkivälissä vaihtimet avataan tarkastuksia ja mekaanisia pesuja varten. Tässä menetelmässä CIP-pesut saattaa olla tarpeen suorittaa kahdesti vuodessa, jotta lämmönvaihdin ei pääse missään vaiheessa likaantumaan niin paljoa, että CIP-pesun tulos heikkenisi liiallisen likaantumisen johdosta. Toimintamallilla lämmönvaihtimien avauskerrat jäisivät viidesosaan nykyiseen huoltotottumukseen verrattuna.

**Lämmönvaihtimen likaisuuden ja tehon seuranta** toteutetaan määrittämällä vertailuarvo puhtaalle lämmönvaihtimelle, esimerkiksi mekaanisten korkeapainepesujen jälkeen, jolloin vaihdin tunnetusti toimii hyvällä teholla. Toinen arvo otetaan, kun tiedetään lämmönvaihtimen olevan likainen ja jäähdytystehon heikentyneen huomattavasti. CIP-pesut toteutetaan silloin, kun lämmönvaihdin ei ole vielä täysin tukkeutunut. Mittauksista voidaan seurata jäähdytystehon ja lämmönsiirtokertoimen palautumista puhtaan tasolle eri likaantumisasteista, ja tämän avulla voidaan määrittää optimaalinen kierrätyspesujen ajankohta.

## 10.3 Uuden toimintamallin käyttöönotto vaiheittain

Vuosihuoltojen toimintamallin muutos tulee ottaa käyttöön vaiheittain, jotta uuden menetelmän toimivuudesta käytännössä voidaan varmistua. Koeryhmäksi tulee ottaa aluksi esimerkiksi noin 30 % vaihtimista, ja niitä aletaan huoltaa uudella menetelmällä. Ensimmäisen vuoden jälkeen, kun uuden toimintamallin toimivuudesta on varmistuttu, voidaan koeryhmää laajentaa vastaamaan noin 60 % vaihtimien lukumäärästä. Toisen vuoden jälkeen uuden toimintamallin voi ottaa kokonaisuudessaan käyttöön, jos menetelmät

ovat osoittautuneet tehokkaaksi. Tällä tavalla voidaan varmistaa jäähdytysvesilaitoksen käytettävyys.

Tarkempi esitys vuosihuoltojen muutoksesta on liitteessä 2, joka on tilaajan pyynnöstä salattu omaan liitteeseensä.

#### 10.4 Muita ehdotuksia toiminnan parantamiseksi

Lämmönvaihtimen likaantumista voisi hidastaa ja vähentää sekä kierrätyspesujen tulosta parantaa johtamalla merivesipuolen tulolinjaan paineilmaa vaihtimen ollessa käytössä. Ilmakuplat kulkeutuisivat täyden merivesivirtauksen mukana vaihtimeen ja aiheuttavat värinää ja ravistusta lämmönsiirtopintoihin, mikä saattaa irrottaa olemassa olevaa kasvustoa ja likaa lämmönsiirtopinnoilta. Etenkin kierrätyspesujen jälkeen pesuliuoksen pehmittämä lika saattaisi irrota hyvin ilmakuplien mukana parantaen pesutulosta. Likaantumista voisi myös ennaltaehkäistä johtamalla paineilmaa säännöllisesti vaihtimiin kesäisin meriveden ollessa lämmintä ja sen mukana tulevan kasvuston määrän ollessa runsasta, esimerkiksi kerran viikossa likaantumisen ollessa suurinta.

Tiivisteidenvaihdon yhteydessä levypakat voi kääntää ylösalaisin, jolloin lämmönsiirtolevyjen ehjät kannatuskorvakkeet tulisivat käyttöön. Tämän jälkeen muutettaisiin huolto-toimintatapoja ehdotetuilla tavoilla, jolloin lämmönvaihtimen avauskerrat jäisivät vähäisemmiksi, kuin nykyisillä huoltotottumuksilla. Tällä tavalla saatetaan saavuttaa huomattavasti pidempi elinikä nykyisille lämmönsiirtolevyille.

Virtausnopeutta kasvattamalla lämmönvaihdinten likaantumista saadaan hidastettua. Pitämällä vain tarvittavan määrän lämmönvaihtimia linjassa, saadaan näiden virtausnopeutta kasvatettua ja likaantumisnopeutta pienennettyä. Seurantajärjestelmän avulla pystyisi selvittämään todellisen vaikutuksen likaantumisen vähentämiseksi ja arvioimaan, onko tämä kannattava menettelytapa.

## 11 Yhteenveto ja päätelmät

Tämän insinööritoimen tarkoituksena oli tutkia ja selvittää JÄÄHDVL2:n yksilöllisen kunnon seurannan automaatiomuutoksen vaatimat toimenpiteet. Tutkimuksessa on arvioitu eri toteutusvaihtoehtojen hyötyjä ja kustannuksia, joiden pohjalta tehtiin investointiehdotus. Tavoitteeseen kuului myös tehdä optimoitu vuosihuoltosuunnitelma uutta kunnonseurantajärjestelmää hyödyntäen. Työn aikana selvisi, että JÄÄHDVL2:n vuosihuollot ovat ajoittuneet oikeaan ajankohtaan ja puhdistustoimenpiteet ovat olleet riittävät. Optimoivalla, mittauksiin perustuvalla huoltotavalla voitaisiin kuitenkin säästää merkittävästi työaikaa ja lämmönvaihtimen kuluvien osien sekä varaosien menekkiä. Tämän työn rajaukseen ei kuulunut ottaa syvällisemmin kantaa vaihtoehtoihin pesumenetelmiin, vaikkakin ne ovat työssä mainittuna.

Työssä selvitettiin, mikä mittausmenetelmä on kaikkein luotettavin tehon ja likaantumisen mittaamiseksi. Luotettavin menetelmä on lämmönsiirron analysointimenetelmä, jossa lasketaan lämmönvaihtimille lämmönsiirtokerroin niiden lämmönsiirtotehon avulla. Lämmönsiirtokerroin kertoo suoraan lämmönvaihtimen likaisuudesta, ja sen trendiviivaa ennustamalla ja vertaamalla vaihtimen lämmönsiirtotehoon voidaan suunnitella lämmönvaihtimen huollot optimaaliseen ajankohtaan, jolloin lämmönsiirtoteho ei ole heikentynyt liikaa. Virtausmittauksia hyödyntämällä rinnakkainkytkennän sisäisiä virtausvaihteluita voidaan mitata ja valita oikea pesumenetelmä vastaamaan kunkin vaihtimen likaisuusastetta. Erottamalla ylimääräinen jäähdytyskapasiteetti rinnakkaiskytkennästä saadaan nostettua jäljelle jäävien lämmönvaihtimien virtausnopeutta. Virtausnopeuden kasvu saattaa vähentää merkittävästi systeemin likaantumista, jolloin huoltovälejä voi pidentää nykyisestä.

Vaihtoehtoiseksi menetelmäksi valittiin lämpötilojen vertailumenetelmä, jossa vaihtimen läpi kulkevien virtausten lähtölämpötiloja vertaillaan keskenään. Lämpötilojen vertailumenetelmän trendiviivasta voidaan nähdä lämmönvaihtimen likaantuminen ja pesujen vaikutus. Menetelmä lisää tietoisuutta, mutta ei anna yhtä luotettavaa ja kattavaa työkalua likaantumisen ennustamiseksi tai huoltomenetelmän ja ajankohdan optimoimiseksi, kuin lämmönsiirron analysointimenetelmä. Menetelmä on yksinkertaisempi toteuttaa, koska siinä ei tarvitse mitata virtausta. Molemmat menetelmät on mahdollista toteuttaa ilman mekaanisia muutoksia asentamalla lämpötila-anturit olemassa oleviin lämpötaskuihin ja käyttämällä clamp-on -tyyppistä ultraäänivirtausmittausta.

Automaatiomuutoksen toteutettavuutta arvioitiin langallisella ja langattomalla tavalla. Järjestelmä kannattaa toteuttaa langallisella toteutuksella. Langaton tiedonsiirtotapa so-  
pii hyvin vastaavanlaisiin kunnonseurantajärjestelmiin, joiden tarkoitus on kerätä tietoa  
laitteista tai järjestelmistä, mutta tähän järjestelmään langaton toteutustapa ei kuitenkaan  
tarjonnut merkittävää etua, koska ultraäänivirtausmittaus vaatii sen verran sähkötehoa,  
että riittävän suuren akuston käyttäminen ei ole järkevää. Langattoman mittaustavan  
mahdollistavaa automaatioinfrastruktuurin laajennusta tulee kuitenkin harkita, koska lan-  
gaton järjestelmä tarjoaa langalliseen järjestelmään verrattuna useissa tilanteissa huo-  
mattavaa etua, jota voisi hyödyntää tulevilla projekteilla.

Työssä on kuvattuna kaksi ehdotusta vaihtoehtoisista vuosihuoltojen toimintamalleista.  
Ensimmäinen ehdotus on vuosittain vaihtuva toimintamalli, jossa levylämmönvaihtimia  
pestään vuorotellen CIP- ja mekaanisilla pesuilla. Toinen ehdotus on seisokkivälin kes-  
tävä toimintamalli, jossa lämmönvaihdin puretaan vain kerran seisokkivälissä ja seisok-  
kivälin puhdistukset suoritetaan CIP-pesuilla. Molempien toimintamallien perusajatus-  
sena on, että lämmönvaihtimien avauskertoja vähentämällä kasvatetaan lämmönvaihti-  
mien elinikää. Tutkimuksen mukaan vuosittain vaihtuva toimintamalli on näistä kannat-  
tavin, ja sen avulla vuosittaisia huoltokustannuksia voitaisiin vähentää 23 %. Toiminta-  
malli vähentäisi myös Nesteen henkilökunnan vuosihuoltoihin käytettyä työaikaa 29 % ja  
urakoitsijan vuosihuoltoihin käytettyä työaikaa 43 %.

Tämän työn tuloksissa huomionarvoista on se, että arvioidut säästöt syntyisivät suoraan  
huoltotoiminnasta. Prosessista riippuen kokonaissäästö saattaa muodostua huomatta-  
vasti suuremmaksi, jos tuotanto joudutaan pysäyttämään lämmönsiirtimien huoltojen  
ajaksi, tai lämmönsiirtimien likaantuminen aiheuttaa rajoitteita tuotannolle.

## Lähteet

1. Instrumentoinnin perusteet, Kenttälaitteet. Verkkodokumentti Nesteen verkkolevyllä. Viitattu 8.12.2017.
2. SFS-ISO 55000. Omaisuudenhallinta. Yleiskuvaus, periaatteet ja termit. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 2014. 45.
3. John Wiley & Sons Inc, Asset integrity management, New Jersey, American Institute of Chemical Engineers Inc, 2017, 496.
4. Paavilainen, J. Mitä on omaisuudenhallinta? Verkkoaineisto. Saatavissa: <<http://urbanassets.fi/>> Viitattu 12.12.2017.
5. Alfa Laval, Tiivisteelliset levylämmönvaihtimet. Verkkoaineisto. Saatavissa: <<https://www.alfalaval.fi/tiivisteelliset-levylammonvaihtimet/>> Viitattu 12.12.2017.
6. Alfa Laval, Huolto ja puhdistus. Verkkoaineisto. Saatavissa: <<https://www.alfalaval.fi/tiivisteelliset-levylammonvaihtimet/huolto/puhdistus/>> Viitattu 13.12.2017.
7. Sondex-Tapiro, Lämmönsiirtimet. Verkkoaineisto. Saatavissa: <<https://www.sondextapiro.fi/fi/tuotteet/lammonsiirtimet>> Viitattu 13.12.2017.
8. Motiva, Lämmönsiirto. Verkkoaineisto. Saatavissa: <[https://www.motiva.fi/yritykset/ohjeita\\_ja\\_vinkkejä/lammonsiirto](https://www.motiva.fi/yritykset/ohjeita_ja_vinkkejä/lammonsiirto)> Viitattu 18.12.2017.
9. M. M. Awad (2011). Fouling of Heat Transfer Surfaces, Heat Transfer - Theoretical Analysis, Experimental Investigations and Industrial Systems. Aziz Belmoudi (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/13696. Saatavissa: <<https://www.intechopen.com/books/heat-transfer-theoretical-analysis-experimental-investigations-and-industrial-systems/fouling-of-heat-transfer-surfaces>> Viitattu 19.12.2017.
10. Neste Oyj, Tietoa meistä. Verkkoaineisto. Saatavissa: <<https://www.neste.com/fi/fi/konserni/tietoa-meist%C3%A4>> Viitattu 21.12.2017.
11. Koivisto, K. Nesteen spesifikaatiokoulutus. Verkkodokumentti Nesteen työtiloissa. Viitattu 2.1.2018.
12. Neste Oyj, Instrumentoinnin yleisspesifikaatio K101. Verkkodokumentti Nesteen työtiloissa. Viitattu 2.1.2018.
13. Fortum, Jäähdytysvesilaitos kaksi esittely. Verkkodokumentti Nesteen verkkolevyllä. Viitattu 4.1.2018.



14. Neste Oyj, CR1586 Langattomat kenttälaitteet ja niiden automaatioverkot. Nesteen spesifikaatio. Viitattu 4.1.2018.
15. Heikkinen, R. Käyttöinsinööri, Neste. Suulliset tiedonannot 1/2018.
16. Rautiainen, A. Vanhempi käyttömestari, Neste. Suulliset tiedonannot 1/2018.
17. Jussila, M. Käyttöinsinööri, Neste. Suulliset tiedonannot 1/2018.
18. Ishiyama E. & William R. Paterson (2011), D. Ian Wilson, Optimum cleaning cycles for heat transfer equipment undergoing fouling and ageing, Chemical Engineering Science, Volume 66, Issue 4, Pages 604-612 Saatavissa: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250910006305#aep-abstract-id12>> Viitattu 15.1.2018.
19. Neste Oyj, Kaapelointi ja kytkennät standardi K-122. Verkkodokumentti Nesteen työtiloissa. Viitattu 16.1.2018.
20. Emerson, Laskuri kenttälaitteiden akkujen kestojälle. Verkkoaineisto. Saatavissa: <<http://www3.emersonprocess.com/rosemount/PowerModuleLifeCalculator/Default.aspx>> Viitattu 16.1.2018.
21. Manninen J, Asiantuntija automaatiojärjestelmät, Neste. Suulliset tiedonannot 1/2018.
22. Emerson, Langattomat kenttälaitteet. Verkkoaineisto. Saatavissa: <<http://www.emerson.com/en-us/expertise/automation/industrial-internet-things/pervasive-sensing-solutions/wireless-technology>> Viitattu 31.1.2018.
23. Incropera, DeWitt, Bergman, & Lavine, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 6th ed. (Wiley, 2007). Saatavissa: <<http://www.che.ufl.edu/unit-ops-lab/experiments/he/he-theory.pdf>> Viitattu 1.2.2018.
24. Hankasalmi, Investoinnin kannattavuus. Verkkoaineisto. Saatavissa: <<http://www.yritystulkki.fi/fi/alue/hankasalmi/toimiva-yrittaja/investoinnin-laskenta/>> Viitattu 6.2.2018.